

**UNIVERSIDADE DE PASSO FUNDO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM PROJETO E PROCESSOS DE  
FABRICAÇÃO - MESTRADO PROFISSIONAL**

**Luiz Eduardo da Silva**

**EFEITO DA MESOGOMETRIA DA BROCA E DAS CONDIÇÕES DE  
LUBRIRREFRIGERAÇÃO SOBRE O ACABAMENTO DO FURO EM AÇO DIN  
S700MC**

Passo Fundo

2016

**Luiz Eduardo da Silva**

**EFEITO DA MESOGOMETRIA DA BROCA E DAS CONDIÇÕES DE  
LUBRIRREFRIGERAÇÃO SOBRE O ACABAMENTO DO FURO EM AÇO DIN  
S700MC**

Orientador: Prof. Dr. Luiz Airton Consalter

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Projeto e Processos de Fabricação da Universidade de Passo Fundo, como requisito para obtenção do grau de Mestre em Projeto e Processos de Fabricação.

Passo Fundo

2016

**Luiz Eduardo da Silva**

**EFEITO DA MESOGOMETRIA DA BROCA E DAS CONDIÇÕES DE  
LUBRIRREFRIGERAÇÃO SOBRE O ACABAMENTO DO FURO EM AÇO DIN  
S700MC**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Projeto e Processos de Fabricação da Universidade de Passo Fundo, como requisito para obtenção do grau de Mestre em Projeto e Processos de Fabricação.

Data de aprovação: 08/07/2016

Os componentes da Banca examinadora abaixo aprovaram a Dissertação:

Professor Doutor Luiz Airton Consalter - Orientador  
Universidade de Passo Fundo - PPGPPF

Professor Doutor Charles Leonardo Israel  
Universidade de Passo Fundo – PPGPPF

Professor Doutor José Antônio Portella  
Universidade de Passo Fundo - PPGPPF

Professor Doutor André João de Souza  
Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus, que me deu força e coragem para chegar ao fim deste desafio. Ele tem me sustentado em toda a minha vida, sempre me mostrando o caminho a ser seguido nos momentos de dificuldade. Obrigado Senhor.

Agradeço à minha esposa Daniele Moraes de Oliveira, meus filhos Eduardo Oliveira da Silva e Davi Luiz Oliveira da Silva que, apesar dos momentos de dificuldade sempre estão ao meu lado me dando apoio. Vocês são um presente de Deus. Amo vocês.

Aos meus pais, pela educação que me repassaram, pelo exemplo de honestidade e perseverança. Muito obrigado.

Ao meu orientador Prof. Dr. Eng. Luiz Airton Consalter pelo seu empenho em me ajudar no desenvolvimento do trabalho, pela sua disposição, revisão e síntese do trabalho.

Ao professor Dr. Eng. Rodrigo Zeilmann pelo apoio, pelas críticas e pelos ensinamentos repassados no início deste trabalho.

Ao Prof. Dr. Charles Leonardo Israel, que fez parte da minha formação acadêmica e pessoal durante todos estes anos de trabalho e me incentivou para que eu iniciasse o curso de mestrado.

Ao prof. Dr. José Antônio Portella pela ajuda e disponibilidade quando o procurei com dúvidas sobre Estatística.

A toda à equipe do Núcleo de Tecnologia Mecânica da Universidade de Passo Fundo em especial ao Eng. Fernando Benvinda e ao Eng. André Hagen que me deram todo o auxílio necessário para a execução dos experimentos e sempre que possível a total disponibilidade das máquinas ferramentas e laboratórios.

A empresa PCP Produtos Siderúrgicos, de Caxias do Sul (RS) certificada da SSAB/Ruukki para distribuição exclusiva de aços de alta resistência no Brasil, pela disponibilidade das chapas de aço.

Ao Grupo de Usinagem (GUS), representadas pelo prof. Dr. Rodrigo Zeilmann, da Universidade de Caxias do Sul (RS), pela disponibilidade das ferramentas utilizadas neste trabalho.

A empresas WM Tools de Caxias do Sul (RS) pela disponibilidade de suas máquinas para afiação das ferramentas utilizadas. A empresa Blaser Swissslube do Brasil pela disponibilidade dos fluídos utilizados nesta pesquisa.

Meu muito obrigado a todos.

*“A gente pensa uma coisa, acaba escrevendo outra e o leitor entende uma terceira coisa... e, enquanto se passa tudo isso, a coisa propriamente dita começa a desconfiar que não foi propriamente dita.”*

*A COISA. Mário Quintana*

## RESUMO

Este trabalho apresenta uma investigação sobre os comportamentos e os efeitos do processo de usinagem por furação em uma liga DIN S700MC, correlacionando a preparação da geometria do gume com diferentes condições de aplicação de fluídos lubrificadorres, com foco no acabamento superficial da peça usinada. Neste contexto, foram realizados ensaios experimentais com diferentes sistemas de lubrificação (abundância, MQL e a seco), utilizando brocas helicoidais inteiriças de metal-duro, revestidas com nitreto de titânio e alumínio, com e sem preparação da mesogeometria (arredondamentos). Como variáveis de resposta foram avaliados a textura (rugosidade), a camada afetada pelo calor ao longo do furo, o perfil de microdureza e o dimensional da rebarba. Os resultados apontaram para uma redução significativa dos valores de rugosidade com a utilização da broca com arredondamentos no flanco, na face e nas guias. Estatisticamente, este resultado não foi influenciado pelas diferentes condições de aplicação dos fluídos lubrificadorres. Em relação ao dimensional da rebarba gerada pelo processo, a ferramenta sem preparação da mesogeometria apresentou os menores valores juntamente com a aplicação do Fluido em abundância (emulsão). Na análise da camada afetada pelo calor a ferramenta com preparação da mesogeometria apresentou os menores valores de camada afetada (modificação microestrutural) e estatisticamente não houve variações significativas entre a aplicação do Fluido em abundância e com mínima quantidade de lubrificante. Na avaliação do perfil de microdureza não foi possível uma conclusão clara da influência das solicitações térmicas e mecânicas sobre a região próxima à borda do furo, devido ao efeito de deformação de borda provocada pela microindentação.

Palavras-chave: Aços ARBL; MQL; Furação a seco; Gume.

## ABSTRACT

This study presents an investigation on the behavior and effect of the machining process by drilling through a DIN S700MC steel alloy, correlating the preparation of cutting edge geometry with different cooling-lubrication conditions, and focusing on the surface finishing of the machined part. In this context, experimental tests were performed with different cooling-lubrication systems (abundance, MQL, and dry) using solid carbide twist drills, coated with titanium aluminum nitride, with or without meso-geometry preparation (roundings). As response variables, the texture (roughness), the layer affected by heat throughout the hole, and microhardness and burr dimensional profiles were assessed. The results indicate a significant reduction of roughness values when using the rounding drill flank, face and guides. Statistically, this result was not influenced by the different cooling-lubrication. Regarding burr dimension generated by the process, the tool with no meso-geometry preparation presented the same values along with the application of fluid in abundance (emulsion). In the analysis of the layer affected by heat, the tool with meso-geometry preparation presented lower values of the affected layer (microstructure change) and, statistically, there were no significant variations between the application of fluid in abundance and with minimum quantity of lubricant. In the evaluation of microhardness profile, there was no clear conclusion about the influence of thermal and mechanical requirements on the region close to the hole edge, because of the effect of edge deformation caused by microindentation.

Keywords: HSLA steel; MQL; Dry drilling; Cutting edge.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 - Representação do modelo do corte ortogonal convencional .....	9
Figura 3.2 - Modelo das ferramentas elementares de corte (FCE).....	10
Figura 3.3 – Formação do cavaco em brocas helicoidais .....	11
Figura 3.4 – Cinemática do corte em brocas helicoidais, representando as cunhas e as direções do corte .....	12
Figura 3.5 – Geometria básica de uma broca helicoidal.....	12
Figura 3.6 – Divisão da geometria de uma broca helicoidal em macrogeometria e geometria do gume .....	13
Figura 3.7 – Macro geometria de uma broca helicoidal .....	13
Figura 3.8 – Mesogeometria de uma broca helicoidal .....	14
Figura 3.9 – Microtopografia de aresta de corte mostrando marcas deixadas pelo processo de retificação .....	15
Figura 3.10 – Esquema do revestimento de Nitreto de titânio-alumínio (TiAlN).....	16
Figura 3.11 - Sistema de aplicação de Fluidos por MQL: externa (A) e interna (B) .....	20
Figura 3.12 – Posicionamento de um bico externo para sistema MQL na furação de uma liga de Ti6Al4V .....	20
Figura 3.13 – Representação das diferentes mesogeometrias de corte.....	23
Figura 3.14 – Aresta de corte sem preparação “A” e com preparação “B” .....	24
Figura 3.15 – Esquema de medição do fator de forma K .....	25
Figura 3.16 – Métodos de modificação da mesogeometria .....	26
Figura 3.17 – Esquema de movimentação das ferramentas no acabamento por arraste .....	27
Figura 3.18 - Efeitos do acabamento por arraste após o revestimento da ferramenta.....	27
Figura 3.19 - Alterações teóricas sobre a geometria do gume, representando uma aresta afiada e o gume arredondado .....	28
Figura 3.20 - Representação do ponto de estagnação do gume arredondado .....	29
Figura 3.21 – Esquema de corte para gumes arredondados representando as zonas de cisalhamento .....	30
Figura 3.22 – Representação das zonas de tensão de compressão e tração.....	30
Figura 3.23 – Representação dos elementos superficiais e subsuperficiais .....	32
Figura 3.24 – Exemplos de erros geométricos encontrados em superfície usinada .....	33

Figura 3.25 – Parâmetro de rugosidade média Ra.....	34
Figura 3.26 – Amostra de material aderido na superfície do furo.....	35
Figura 3.27 – Esquema de avaliação da deformação plástica triangular (DPT).....	36
Figura 3.28 - Tipos de rebarbas gerada no processo de furação.....	39
Figura 3.29 – Esquema de formação da rebarba tipo chapéu (B) e tipo coroa (A).....	40
Figura 3.30 – Esquema de medição de altura e espessura da rebarba gerada.....	41
Figura 3.31 – Camada afetada pelo calor (CAC).....	43
Figura 3.32 - Representação da Camada afetada pelo calor na furação de um aço AISI 434..	45
Figura 4.1 – Metodologia experimental dos ensaios.....	47
Figura 4.2 – Maquinas utilizadas para os ensaios de furação e corte dos CP's.....	48
Figura 4.3 – Sistema de aplicação mínima quantidade de lubrificante (MQL).....	48
Figura 4.4 – Microscópio eletrônico de varredura (MEV) e rugosímetro portátil.....	49
Figura 4.5 – Equipamentos de análise da microestrutura e dispositivo de medição da broca..	50
Figura 4.6 – Micrografia sem ataque em “A” (ampliação de 100x) e espectro por EDS em B”.	52
.....	52
Figura 4.7 – Micrografia em microscópio óptico em “A” (ampliação de 500x) e em MEV em “B”.....	52
Figura 4.8 – Broca utilizadas nos ensaios de furação com suas respectivas terminologias (ampliação de 500x).....	54
Figura 4.9 – Broca sem preparação de gume – Ferramenta “A”.....	55
Figura 4.10 – Broca com preparação de gume - Ferramenta “B”.....	55
Figura 4.11 - Medição da rugosidade na face das brocas.....	56
Figura 4.12 – Corpo de prova para furação.....	58
Figura 4.13 – Mesogeometria da ferramenta utilizada.....	59
Figura 4.14 – Verificação do erro de batimento com relógio comparador.....	60
Figura 4.15 - Imagem das posições referentes a medições de rugosidade.....	63
Figura 4.16 – Esquema de visualização da textura dos furos.....	64
Figura 4.17 - Esquema de orientação das medidas realizadas na rebarba gerada na saída dos furos.....	65
Figura 4.18 - Esquema de visualização da camada afetada pelo calor.....	65
Figura 4.19 - Esquema de visualização das leituras de microdureza.....	66
Figura 5.1 – Valores médios de rugosidade <i>versus</i> os Fluidos lubrificarrefrigerantes e as ferramentas sem preparação (A) e com preparação (B).....	69

Figura 5.2 - Valores de rugosidade <i>versus</i> Fluídos com as texturas da superfície na Entrada dos furos .....	71
Figura 5.3 – Região de material aderido da superfície de Entrada do furo .....	75
Figura 5.4 - – Interação dos valores de rugosidade na Saída dos furos.....	77
Figura 5.5 – Topografia geral da rebarba gerada no processo de furação.....	78
Figura 5.6 – Representação da morfologia das rebarbas com a aplicação do Fluído em abundância para as ferramentas sem preparação (A) e com preparação (B).....	79
Figura 5.7 - Valores médios da altura e espessura das rebarbas geradas pelo processo de furação .....	80
Figura 5.8 - Valores médios da camada afetada pelo calor, medidos na entrada, meio e saída dos furos, utilizando as ferramentas sem preparação “A” e com preparação “B”. .....	82
Figura 5.9 - Representação das camadas afetadas pelo calor – Ferramenta A.....	83
Figura 5.10 - Representação das camadas afetadas pelo calor – Ferramenta B .....	85
Figura 5.11 - Perfis de microdureza dos furos usinados - Ferramenta A .....	87
Figura 5.12 - Perfis de microdureza dos furos usinados - Ferramenta B .....	88
Figura B.1 – Retifica CNC em “A” e equipamento para acabamento por arraste em “B” ....	109

## LISTA DE TABELAS

Tabela A 1 - ANOVA para os valores de Rugosidade (Ra).....	103
Tabela A 2 - Teste de Tukey para ferramenta - Rugosidade.....	103
Tabela A 3 - Teste de Tukey para os Fluídos - Rugosidade.....	103
Tabela A 4 - Teste de Tukey para condição de entrada e saída dos furos - Rugosidade.....	103
Tabela A 5 - ANOVA para os valores de rugosidade entre os Fluídos.....	103
Tabela A 6 - Teste de Tukey para o Fluido, dentro do grupo da ferramenta “A”.....	104
Tabela A 7 - Teste de Tukey para o Fluido, dentro do grupo da ferramenta “B”.....	104
Tabela A 8 - ANOVA para os valores de rugosidade entre as condições de entrada e saída	104
Tabela A 9 - Teste de Tukey para condição, dentro do grupo da ferramenta “A”.....	104
Tabela A 10 - Teste de Tukey para a condição, dentro do grupo da ferramenta “B”.....	104
Tabela A 11 - ANOVA para os valores de rebarba.....	105
Tabela A 12 - Teste de Tukey para ferramentas - Rebarba.....	105
Tabela A 13 - Teste de Tukey para os Fluídos - Rebarba.....	105
Tabela A 14 - ANOVA para os valores de rebarba entre os Fluídos.....	105
Tabela A 15 - Teste de Tukey para ferramenta A - Fluido.....	105
Tabela A 16 - Teste de Tukey para ferramenta B - Fluido.....	106
Tabela A 17 - ANOVA para os valores de camada afetada pelo calor (CAC).....	106
Tabela A 18 - Teste de Tukey para as ferramentas - CAC.....	106
Tabela A 19 - Teste de Tukey para os Fluídos - CAC.....	106
Tabela A 20 - Teste de Tukey para as condições - CAC.....	106
Tabela A 21 - ANOVA para a CAC entre o grupo das ferramentas considerando os Fluídos .....	107
Tabela A 22 - Teste de Tukey para os Fluídos dentro do grupo da ferramenta A.....	107
Tabela A 23 - Teste de Tukey para os Fluídos dentro do grupo da ferramenta B.....	107
Tabela A 24 - ANOVA para os valores de microdureza HV.....	107
Tabela A 25 - Teste de Tukey para as ferramentas - Microdureza.....	107
Tabela A 26 - Teste de Tukey para os Fluídos - Microdureza.....	108
Tabela A 27 - Teste de Tukey para as condições - Microdureza.....	108

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

AlCrN – Nitreto de cromo alumínio

ARBL – Aços de alta resistência e baixa liga

ASTM - Sociedade Americana para Testes e Materiais (*American Society for Testing and Materials*).

AISI - Instituto Americano de classificação dos aços (*American Iron and Steel Institute*).

BS – Normas Padrões Britânicas (*British Standard*).

CAC – Camada afetada pelo calor

CO<sub>2</sub> – Dióxido de carbono

DIN - Instituto Alemão de Normalização (*Deutsches Institut für Normung*).

EN - Padrão Europeu (*European Standard*).

EUA – Estados Unidos da América (*United States of America*)

EDS - Espectroscopia de energia dispersiva por raio x (*Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy*)

HRC – Dureza Rockwell C

HV – Dureza Vickers

MPa – MegaPascal

MEV - Microscópio Eletrônico de Varredura

MQL – Mínima quantidade de lubrificante

TiAlN - Nitreto de alumínio - titânio

TiN – Nitreto de titânio

PVD - Deposição física de vapor (*Physical Vapour Deposition*)

Wc - Carboneto de tungstênio

## LISTA DE SÍMBOLOS

<b>Símbolo</b>	<b>Unidade</b>	<b>Descrição</b>
C		Carbono
Ti		Titânio
Nb		Nióbio
V		Vanádio
Mn		Manganês
N		Nitrogênio
Te		Telúrio
Vc	mm/min	Velocidade de corte
f	mm/rot	Avanço
Ra	μm	Rugosidade média
S <sub>y</sub>	μm	Comprimento do arredondamento na superfície de saída
S <sub>α</sub>	μm	Comprimento do arredondamento na superfície de incidência
VB	mm	Largura média de desgaste de flanco
h	mm	Espessura do material não removido
he	mm	Espessura do cavaco removido

## LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1

$$K = \frac{S\gamma}{S\alpha}$$

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>OBJETIVOS .....</b>	<b>3</b>
2.1	Objetivo Geral .....	3
2.1.1	Objetivos Específicos .....	3
2.2	Justificativa.....	4
<b>3</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>5</b>
3.1	Aços de Alta Resistência e Baixa Liga (ARBL) .....	5
3.1.1	Usinabilidade dos Aços ARBL .....	6
3.1.2	Aço DIN S700MC .....	7
3.2	Processo de Furação .....	8
3.2.1	Modelo da Mecânica do Corte em Brocas Helicoidais .....	8
3.2.1.1	Geometria de Brocas Helicoidais .....	12
3.2.1.2	Substrato e Revestimento .....	15
3.2.2	Usinagem com Variação de Fluido Lubrificador.....	17
3.2.2.1	Furação em Abundância (Emulsão) .....	17
3.2.2.2	Furação com Mínima Quantidade de Lubrificante (MQL).....	18
3.2.2.3	Furação a Seco.....	22
3.2.3	Variação da Mesogeometria das Ferramentas .....	22
3.2.3.1	Mesogeometria de Ferramentas de Corte .....	23
3.2.3.2	Métodos para Modificação das Mesogeometrias .....	25
3.2.3.3	Processo Mecânico de Acabamento por Arraste .....	26
3.2.3.4	Efeitos do Acabamento por Arraste na Superfície Usinada .....	28
3.3	Integridade Superficial (I.S) .....	31
3.3.1	Aspectos Superficiais .....	33
3.3.1.1	Rugosidade .....	34
3.3.1.2	Rebarba.....	38
3.3.2	Aspectos Sub Superficiais .....	42
3.3.2.1	Camada Afetada pelo Calor (CAC).....	42
3.3.2.2	Perfil de Dureza .....	46
<b>4</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>47</b>
4.1	Primeira Etapa .....	50

4.1.1	Caracterização do Material-base à Furar .....	51
4.1.1.1	Ensaio de Tração .....	53
4.1.1.2	Leitura de Dureza (HV).....	53
4.1.2	Ferramentas de Corte Utilizadas.....	53
4.1.3	Pré-testes e ajustes .....	56
4.2	Segunda Etapa .....	57
4.2.1	Corpos de Prova para Furação.....	57
4.2.2	Preparação das Ferramentas de Corte.....	58
4.2.3	Caracterização Dimensional da Mesogeometria Utilizada.....	58
4.2.4	Fixação das Ferramentas .....	60
4.2.5	Variáveis de entrada Utilizadas na Experimentação .....	61
4.2.6	Variáveis de Saída Analisadas.....	62
4.2.6.1	Procedimento de Medição de Rugosidade .....	62
4.2.6.2	Imagem da Textura dos Furos .....	63
4.2.6.3	Análise da Rebarba na Saída do Furo.....	64
4.2.6.4	Avaliação da Camada Afetada pelo Calor.....	65
4.2.6.5	Medição do Perfil de Dureza.....	66
4.2.7	Análise Estatística .....	66
<b>5</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>68</b>
5.1	Rugosidade e Textura dos Furos .....	68
5.1.1	Ferramentas “A” e “B” - Entrada dos furos .....	70
5.1.2	Ferramentas “A” e “B” - Saída dos furos.....	76
5.2	Rebarba.....	78
5.3	Camada afetada pelo Calor (CAC).....	81
5.4	Perfil de microdureza.....	86
<b>6</b>	<b>CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....</b>	<b>90</b>
6.1	Conclusões.....	90
6.2	Sugestões para trabalhos futuros .....	93
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>94</b>

# 1 INTRODUÇÃO

A evolução das tecnologias na área metal-mecânica foi praticamente impulsionada, com grandes avanços, a partir da revolução industrial do século XIX. O aumento da fabricação de produtos e equipamentos de consumo em escala industrial aumentou proporcionalmente ao crescimento da população. Neste mesmo período, houve um incremento na produção de diferentes composições e tipos de matéria prima para atender à crescente demanda. Os aços produzidos para uso industrial passaram por adequações para atender as necessidades de resistência mecânica da época. Em relação à usinagem destes materiais, a utilização de fluídos lubrificarrefrigerantes proporcionou incrementos nos tempos de vida das ferramentas de corte, na produtividade e na economia da usinagem, bem como na qualidade das superfícies usinadas.

Porém, com o alto crescimento da produção, não foi dada a devida atenção aos problemas relacionados ao meio ambiente no que se refere ao consumo de energia para fabricação, poluição e descarte correto de produtos químicos utilizados na fabricação destes produtos. Já na década de 70, com leis mais rigorosas em relação ao controle da poluição e descarte inadequado dos fluídos de corte, os processos de fabricação passaram por algumas adequações.

Nos dias atuais, há uma forte cobrança e uma grande expectativa em relação à redução dos problemas causados direta e indiretamente pelo alto consumo de combustível, emissão de CO<sub>2</sub> e uso de fluídos lubrificarrefrigerantes na indústria metal-mecânica. Neste sentido, algumas ações preventivas estão sendo pesquisadas, como o uso de aços de alta resistência e baixa liga (ARBL), usinagem com uso parcial ou totalmente sem Fluido lubrificarrefrigerante e melhoramentos na mesogeometria de ferramentas de corte (GORNI, 2009).

A utilização dos aços ARBL tem apresentado resultados satisfatórios em relação à resistência/peso das estruturas quando comparados com os aços ao carbonos convencionais. Dependendo da composição química, esses aços podem ser até 30% mais leves, mas com a mesma resistência mecânica, pois utilizam chapas menos espessas, contribuindo para redução de peso dos componentes e, conseqüentemente, para a redução do consumo de combustível e de outros fatores que são intrínsecos a esta condição. Isso incrementa a demanda de usinagem deste material e, conseqüentemente, o devido conhecimento sobre o comportamento durante o corte do mesmo (KHAN *et al.*, 2014).

No entanto, apesar da tendência pela utilização dos aços avançados de alta resistência e baixa liga, poucos trabalhos retratam o seu comportamento durante os processos de usinagem. Um dos processos mais utilizados na indústria metal-mecânica é a furação com broca helicoidal. Estima-se que 30% do total de operações de usinagem estejam relacionados à furação e, com isto, diversas frentes de pesquisa têm abordado este processo.

Algumas empresas fabricantes de ferramentas e alguns centros de pesquisas têm encontrado resultados satisfatórios em alguns casos, com a modificação da mesogeometria (arredondamento do gume) das ferramentas, as quais têm mostrado um aumento significativo na vida útil da ferramenta, possibilitando um incremento dos parâmetros de corte e, conseqüentemente, uma redução dos tempos de processo (TUSSET, 2015).

Outro tema bastante pesquisado e debatido refere-se aos tipos e formas de aplicação de fluídos lubrificador-refrigerantes. A utilização de fluídos biodegradáveis, semissintéticos, sistemas de mínima quantidade de lubrificante (MQL) e usinagem totalmente sem Fluido são algumas alternativas para reduzir os impactos ao meio ambiente e para todas as questões relacionadas à saúde dos trabalhadores.

Neste contexto, este trabalho visa avaliar os efeitos da preparação da mesogeometria da broca, correlacionando com diferentes formas de aplicação de meios lubrificador-refrigerantes (abundância, MQL e a seco) e tendo como foco o acabamento superficial das peças usinadas, representado pelos aspectos superficiais de topografia, rugosidade (textura) e dimensionamento da rebarba gerada; e a característica mecânica (microdureza) e metalúrgica (camada afetada pelo calor), as quais podem influenciar o desempenho funcional de componentes usinados com o aço ARBL DIN S700MC.

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo Geral**

Investigar os efeitos da preparação da mesogeometria e da variação das condições de aplicação de fluídos lubrificadorres sobre o acabamento superficial na furação do aço de alta resistência e baixa liga DIN S700MC.

#### **2.1.1 Objetivos Específicos**

Investigar os efeitos da modificação geométrica das quinas, guias e gumes principais em brocas de metal duro revestidas com nitreto de titânio e alumínio (TiAlN) e da variação das condições de lubrificação na furação do aço DIN S700MC sobre:

- a rugosidade (textura) da parede dos furos;
- a altura e a espessura da rebarba;
- a camada afetada pelo calor;
- a microdureza na subsuperfície da parede do furo.

## 2.2 Justificativa

Devido à nova realidade no mercado nacional, há uma necessidade de redução dos custos globais de produção para manter a competitividade. Neste sentido, todas as ações de redução de gastos devem ser avaliadas de forma criteriosa.

Nesta perspectiva, este trabalho se justifica pela relevância dos temas abordados, sendo que a utilização de aços de alta resistência e baixa liga (como o DIN S700MC) mostra-se como uma possibilidade de redução de peso de estruturas, de um modo geral. Esta liga metálica apresenta uma característica relevante que reúne resistência mecânica e dureza intermediária o que, em alguns casos, não requer tratamentos térmicos posteriores, contribuindo para a redução dos custos.

Porém, tratando-se da usinabilidade destas ligas, faltam informações quanto ao seu comportamento no processo de furação. Na usinagem, sabe-se da importância dos fluídos para toda a mecânica do corte. No entanto, sua substituição por outras formas de aplicação (mínima quantidade de lubrificante e totalmente a seco) tem sido amplamente discutida e tem mostrado resultados satisfatórios, o que pode ser uma alternativa de redução dos custos de produção sem perder a qualidade, de um modo geral.

Portanto, para toda e qualquer modificação, seja de material-base ou variação de macro e microgeometria, as variações de sistemas de lubrificação necessitam de estudos mais elaborados quanto aos seus efeitos sobre a integridade do produto final, para que os efeitos destas variações não contribuam para a redução da vida em fadiga dos componentes.

Assim, torna-se relevante possuir informações que possam auxiliar os profissionais da área de usinagem quanto aos efeitos gerados pelo processo de furação em meios mais severos de corte. O domínio total do processo tornará o produto final mais competitivo em relação aos custos, à produtividade elevada e ao produto final de excelente qualidade.

### 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo serão abordados alguns aspectos fundamentais sobre o processo de furação, conceitos, características sobre o material-base, ferramentas de corte, condição de aplicação de meios lubrificantes e a metodologia para avaliações das variáveis propostas.

#### 3.1 Aços de Alta Resistência e Baixa Liga (ARBL)

Os aços ARBL ou HSLA (*High Strength Low Alloy*) surgiram na década de 1930 por interesses econômicos e tecnológicos na tentativa das siderúrgicas em atender as restrições ao consumo de energia e contribuir para a preservação do meio ambiente. Porém, o custo elevado dos elementos de liga, o qual era adicionado aos aços ao C-Mn, tornou o processo uma curiosidade científica. Com a crise do petróleo e a alta concorrência dos polímeros e do alumínio, as siderúrgicas tiveram que encontrar alternativas para não perder espaço no mercado. Já na década de 1990, com o ambiente extremamente competitivo em escala global e o desafio ecológico imposto ao setor metal mecânico, a evolução metalúrgica das chapas de aço tornou-se uma forma de sobrevivência no mercado. Neste período, os aços ARBL passaram por melhorias significativas e se enquadraram em uma nova classificação de aços, passando à serem chamados de aços de alta resistência e baixa liga (GORNÍ, 2009).

Os aços de alta resistência e baixa liga, fazem parte do grupo de aços de baixo carbono, que se beneficiam da adição de elementos de liga (Ti, Nb e V) que, em pequenas quantidades, combinam-se com carbono (C) e nitrogênio (N), formando carbonetos, nitretos e complexos precipitados (carbonitretos), os quais exercem influência sobre as propriedades mecânicas e micro-estruturais, quando seus valores não ultrapassam 0,1% em massa. Estas ligas de aço utilizam-se de processos termomecânicos de laminação, visando o controle e o refinamento da microestrutura, obtendo propriedades adequadas para as diferentes aplicações (VEERABABU *et al.*, 2010; SILVA, 2010; GUO *et al.*, 2010; XINPINH *et al.*, 2010; CALLISTER E WILLIAM, 2012; PARK *et al.*, 2013; SILVA, 2014).

Segundo WANG *et al.*, (2009) a classificação dos aços ARBL dependem da resistência do material que pode variar entre 650 até 900 MPa. A resistência mecânica está correlacionada com a quantidade de elementos de liga, do refino de grão e na manutenção da temperatura durante a laminação termomecânica.

### 3.1.1 Usinabilidade dos Aços ARBL

Apesar de toda a pesquisa e o desenvolvimento de tecnologias na área de usinagem, faltam estudos científicos que abordem o processo de furação em aços de alta resistência e baixa liga. Contudo, os aços ARBL podem ter propriedades similares aos aços temperados e revenidos. Porém, com um custo/benefício superior. Suas propriedades mecânicas estão relacionadas diretamente com a composição química da liga e seu processo de obtenção (GORNI, 2009; SIVARAMAN *et al.*, 2015).

Machado *et al.* (2011a), no estudo sobre a usinabilidade do aço de alta resistência e baixa liga DIN 38MnS6 pelo processo de furação, avaliaram diferentes percentuais do elemento químico telúrio (Te) na composição do material, variações de velocidades de corte, avanços e sistema de lubrificação utilizando mínima quantidade de lubrificante (MQL) com fluxos variados, na tentativa de otimizar e aumentar a vida útil da ferramenta. Os autores concluíram que, utilizando um percentual maior de telúrio, a vida da ferramenta aumentou 100% nas condições de corte investigadas. O aumento da velocidade de corte e do avanço, reduziram a vida da ferramenta devido ao aumento da temperatura potencializar os mecanismos de desgaste. O incremento do fluxo do sistema MQL de 30 para 100 ml/h mostrou-se pouco significativo na tentativa de aumentar a vida da ferramenta, fato explicado pela temperatura ser maior utilizando um fluxo de 30 ml/h, o que facilitaria o cisalhamento do material.

Sivaraman *et al.* (2015), em um estudo sobre torneamento de aços de alta resistência e aços temperados e revenidos, onde foram avaliados efeitos dos parâmetros de corte (velocidade de corte, avanço e profundidade de corte) e forças (força de avanço e força radial) concluíram que as forças de corte tendem a diminuir com o aumento da velocidade de corte para vários avanços e profundidades de corte em ambos os materiais. Nesses ensaios, os parâmetros otimizados foram: velocidade de corte de 80 m/min, avanço de 0,05 mm/rot e profundidade de corte 0,1 mm, baseados na redução das forças de corte. Tais conclusões foram explicadas pela microestrutura dos aços microligados analisados serem formados por ferrita poligonal e bainita, o que podem contribuir no incremento da usinabilidade destes materiais, quando comparadas às ligas temperadas e revenidas com estrutura martensítica (abrasivas).

Em um estudo realizado por Demir (2008), no torneamento de aços alta resistência de baixa liga (ARBL) com diferentes perfis de durezas [como recebido (14,3 HRC), resfriado em água (44,9 HRC), resfriado em ar (14,41 HRC)], foram investigadas as influências da velocidade de corte (vc) sobre as forças de corte e sobre os valores de rugosidade da superfície

torneada. As velocidades de corte utilizadas foram 60,90,120,150 mm/min, avanço 0,1 mm/rot e profundidade de corte 1mm, aplicando ferramenta de metal duro com revestimento de TiN. O autor concluiu que o aumento da “vc” reduz significativamente a rugosidade nos materiais usinados. As forças de corte não apresentaram variações significativas com a variação da microestrutura e dureza, exceto nas amostras com dureza próxima de 45 HRC (resfriada em água), onde as forças de corte aumentaram.

Ebrahimi e Moshksar (2009), em um estudo sobre a comparação da usinabilidade em alargamento de furo em um aço microligado 38MnVS5 sem tratamento térmico e em aços AISI 1045 e AISI 5140 temperados e revenidos, considerando as forças de corte e desgaste de flanco ( $V_B$ ), os autores citam que, no aço microligado, a vida útil da ferramenta apresentou um acréscimo em relação aos aços temperados e revenidos com dureza similares, pois a presença de partículas duras de martensita são abrasivas, reduzindo a vida da ferramenta. As forças de corte também foram menores nos aços microligados, juntamente com espessuras de cavacos menores, em relação aos aços temperados e revenidos.

Devido às propriedades mecânicas inerentes dos aços ARBL, principalmente resistência mecânica e dureza, sua usinabilidade é considerada reduzida. Estes aços são em média 20 a 30% mais leves que os aços carbono com a mesma resistência a tração (KHAN *et al*, 2014).

Segundo Demir (2008), os trabalhos sobre usinabilidade de aços alta resistência e baixa liga são poucos explorados. Os pesquisadores estão desenvolvendo pesquisas principalmente na área de conformabilidade e soldabilidade destas ligas.

### 3.1.2 Aço DIN S700MC

A principal característica desta liga metálica é a tensão de escoamento próximo de 700 MPa e a tensão máxima variando entre 750 a 900 MPa, com alongamento mínimo de 12%. A microestrutura observada neste aço é composta por ferrita poligonal refinada e bainita, com grãos variando entre 2 a 6  $\mu\text{m}$ , carbonetos de nióbio, titânio e vanádio, normalmente de difícil visualização (WANG, 2008).

Segundo a norma BS 10025:2004, a letra “S” significa um aço estrutural, o número 700 representa a resistência ao escoamento em MPa, a letra “M” indica que esse aço é produzido por laminação termomecânica e “C” que são conformáveis a frio.

A norma BS 1049:1996 determina as faixas de composição química para a qualidade S700MC. Esses aços atendem as especificações da norma EN 10149-2. Com resistência ao impacto de 40 J a uma temperatura de -60 °C, tanto no sentido longitudinal como transversal.

Alguns ramos da indústria estão utilizando esta liga como alternativa de construção de componentes em navios, guindastes, automóveis, plataformas de petróleo e linhas de transmissão de óleo e gás. (VEERABABU *et al.*, 2010).

Não foram localizados artigos científicos sobre usinabilidade desta liga metálica.

### **3.2 Processo de Furação**

A norma DIN 8589-2 define furação como sendo um processo de usinagem com movimento rotativo principal, isto é, com movimento de corte circular, no qual a ferramenta pode apresentar apenas um movimento de avanço no sentido de seu eixo de rotação, que mantém sua posição em relação à ferramenta e a peça.

O processo de furação é bastante utilizado nas indústrias aeroespacial, aeronáutica, automotiva, transportes pesados e mecânica em geral. Há diversos processos de obtenção de furos, os quais incluem usinagem a laser, usinagem ultrassônica, usinagem eletrolítica e usinagem por jato abrasivo. Porém, a usinagem convencional de furação com brocas, ainda é a mais utilizada por razões econômicas (KURT *et al.*, 2008).

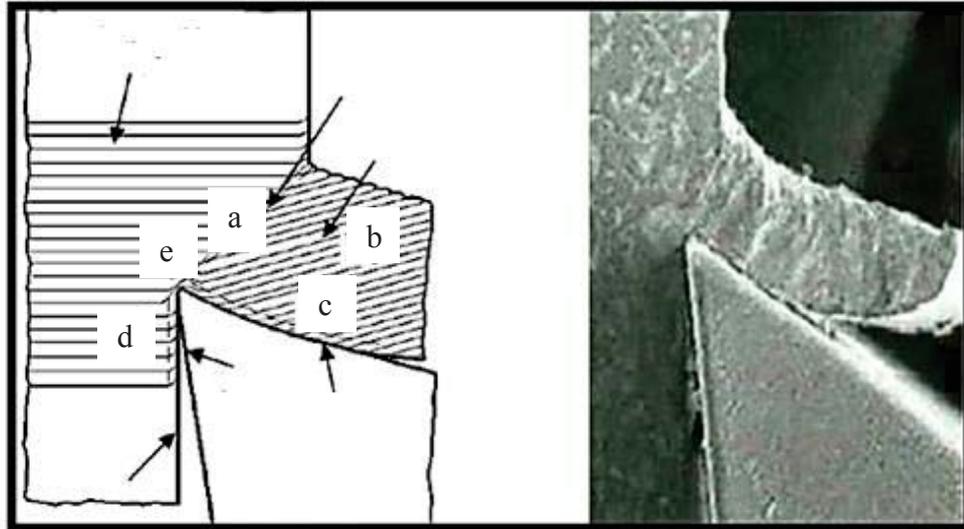
Klocke (2011) aponta algumas particularidades do processo de furação, o qual o diferencia de outros processos de usinagem, tais como: variação da velocidade de corte no centro da ferramenta (igual a zero) e na periferia (valor máximo), dificuldade no transporte do cavaco para fora do furo, distribuição inadequada de calor na região de corte, desgaste acentuado nas quinas da broca e atrito das guias/parede do furo.

#### **3.2.1 Modelo da Mecânica do Corte em Brocas Helicoidais**

A formação do cavaco tem influência direta no desgaste da ferramenta, nos esforços de corte, no calor gerado durante a usinagem e na penetração dos fluídos de corte. Portanto, aspectos econômicos, qualidade da peça usinada, segurança do operador e melhor utilização dos recursos da máquina ferramenta são fatores que estão intrínsecos à remoção de material da peça usinada (DINIZ *et al.*, 2013).

Os mecanismos de formação de cavacos têm como base o modelo simplificado de corte ortogonal, que é ilustrado na Figura 3.1.

Figura 3.1 - Representação do modelo do corte ortogonal convencional



Fonte: Adaptado de NICOLA (2012).

O mecanismo de formação do cavaco é considerado um processo cíclico e dividido em 4 etapas: recalque (deformação elástica), deformação plástica, ruptura e saída de material (MARQUES, 2012).

Devido à penetração da cunha da ferramenta na peça, uma pequena porção do material é pressionada contra a superfície de saída da ferramenta (c). Esta porção de material sofre uma deformação elástica e em seguida uma deformação plástica gradual, levando a criação de planos de cisalhamento (a). As tensões aumentam de forma sucessiva, até o surgimento de uma trinca em (e) que obedece a um critério próprio de propagação de trinca sendo dúctil ou frágil.

As propriedades do material e as condições de avanço e de velocidade de corte irão determinar se a porção de material permanece unida ao cavaco formado, dando origem aos cavacos contínuos, ou fragmentarão, dando origem a cavacos descontínuos, conforme a extensão e a resistência da união entre as lamelas no material rompido. O movimento relativo entre peça/ferramenta forçará o cavaco a escorregar sobre a superfície de saída da ferramenta, dando origem a uma nova lamela de material do plano de cisalhamento, continuando o processo, repetindo diversas vezes este fenômeno (MACHADO *et al.*, 2011b).

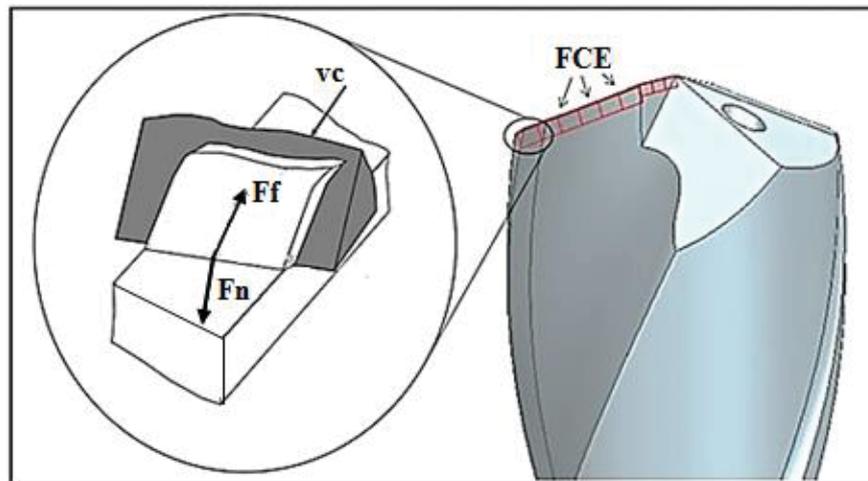
No que diz respeito a formação do cavaco no processo de furação utilizando brocas helicoidais, este é um fenômeno variável ao longo dos gumes. Devido à geometria da

ferramenta e a seus ângulos de corte, a formação dos cavacos pode variar continuamente na região de corte (GUIBERT *et al.*, 2009; BORDIN, 2013).

A grande parte dos processos de corte de materiais baseia-se no corte ortogonal. No processo de furação, uma ampliação desse modelo pode ser utilizada para representar o processo com mais simplicidade e precisão. Porém, nos gumes principais a ação de corte é um processo de corte oblíquo com ângulos de saída e inclinação variáveis ao longo da região de corte (BORDIN, 2013).

O material removido pela ferramenta pode ser considerado como o somatório de pequenos elementos individuais representados por fatias do corte ortogonal chamados de ferramentas elementares de corte (FCE) distribuídos ao longo dos gumes. A Figura 3.2 representa as FCE com a distribuição das forças no plano da face; ilustra também a força de atrito ( $F_f$ ) e a força normal ( $F_n$ ), que são proporcionais à seção transversal do cavaco gerado (ABELE *et al.*, 2011).

Figura 3.2 - Modelo das ferramentas elementares de corte (FCE)

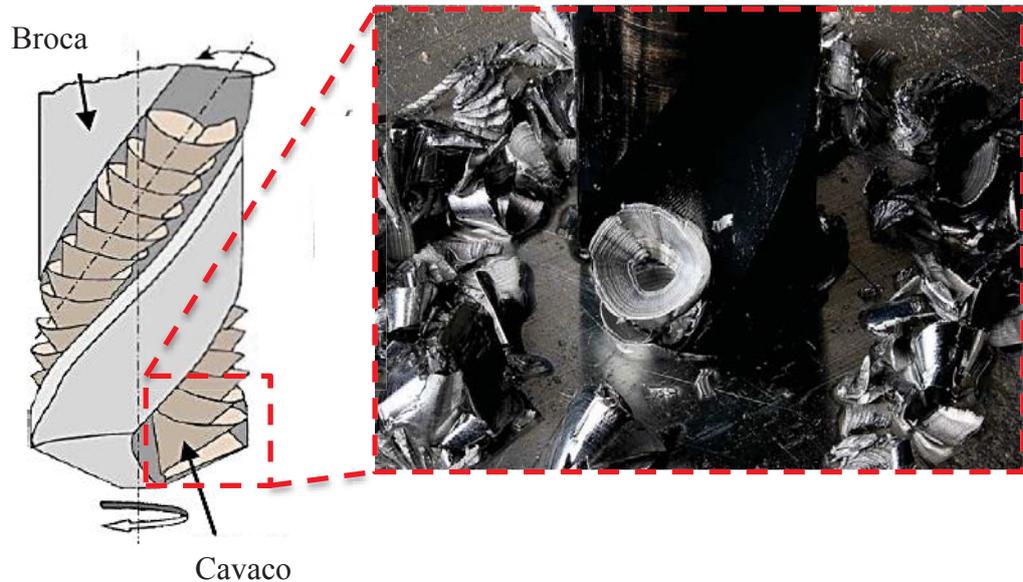


Fonte: Adaptado ABELE *et al.*, (2011).

Há diferentes fenômenos que ocorrem durante o corte do material utilizando brocas helicoidais. Nos gumes principais que apresentam ângulos positivos, o material sofre um cisalhamento devido às altas deformações plásticas locais, tendo seus valores de tensão ultrapassados, juntamente com a velocidade de corte maior na região da quina, o que facilita o corte. Já na região central da broca (gume transversal), o material é deformado por extrusão devido aos ângulos serem negativos e a velocidade de corte muito baixa nesta região (GUIBERT *et al.*, 2009; BORDIN, 2013).

A formação do cavaco é um fator importante na forma final do furo. Quando o cavaco é gerado, o gume transversal tem velocidade baixa, produz um cavaco mais curto em relação à posição da quina da broca, que apresenta velocidade maior e com isso, forma-se um cone no cavaco gerado conforme Figura 3.3.

Figura 3.3 – Formação do cavaco em brocas helicoidais



Fonte: Adaptado de HEILER *et al.*, (2011).

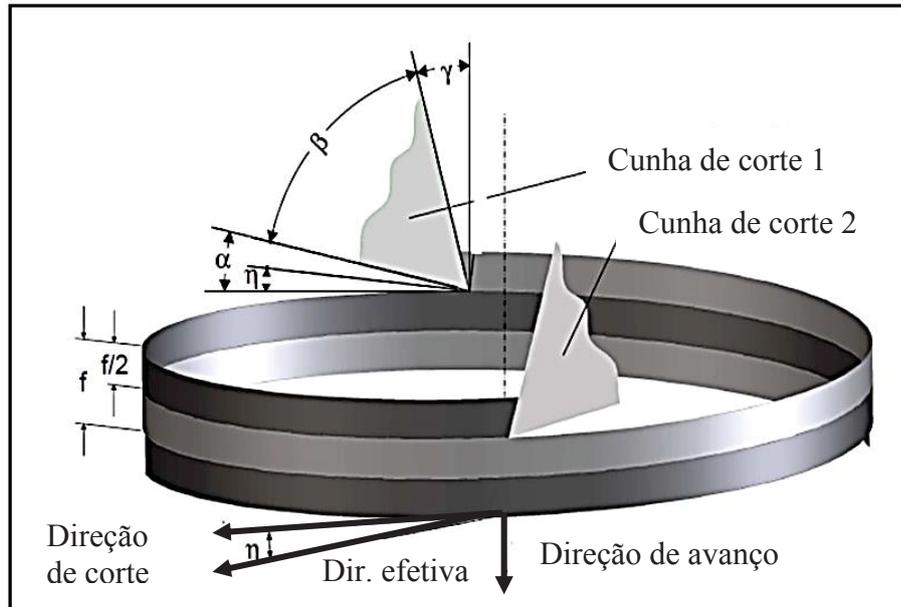
Por apresentar esta diferença de tamanho, o cavaco escoo para o centro do canal helicoidal com auxílio da rotação da broca. Este movimento faz com que o cavaco espiral tenha dificuldade de manter-se nesta forma à medida que a broca penetra mais no material da peça. Sem conseguir acompanhar a rotação da broca, o cavaco rompe-se ou movimentando-se sem girar, formando cavacos de formas variáveis (HEILER *et al.*, 2011; KRISHNARAJ *et al.*, 2013).

O cavaco que deixa o gume principal passará por outra deformação, resultado da interação entre cavaco/canal do helicóide/parede do furo (BORDIN, 2013).

Nestas circunstâncias, a superfície resultante da remoção de material utilizando broca helicoidal será o resultado da ação de corte da quina da broca, do atrito gerado pela guia da ferramenta com a parede do furo oriundo do movimento de avanço efetivo, correlacionado com a rotação e o avanço (HARDY *et al.*, 2009).

Para um melhor entendimento da mecânica do corte durante a furação utilizando broca helicoidal, faz-se uso dos deslocamentos cinemáticos dos gumes. Os principais movimentos e direções da ferramenta responsáveis pelo corte efetivo das brocas, podem ser visualizados na Figura 3.4 onde a direção de avanço, a direção de corte e a direção efetiva são ilustradas.

Figura 3.4 – Cinemática do corte em brocas helicoidais, representando as cunhas e as direções do corte

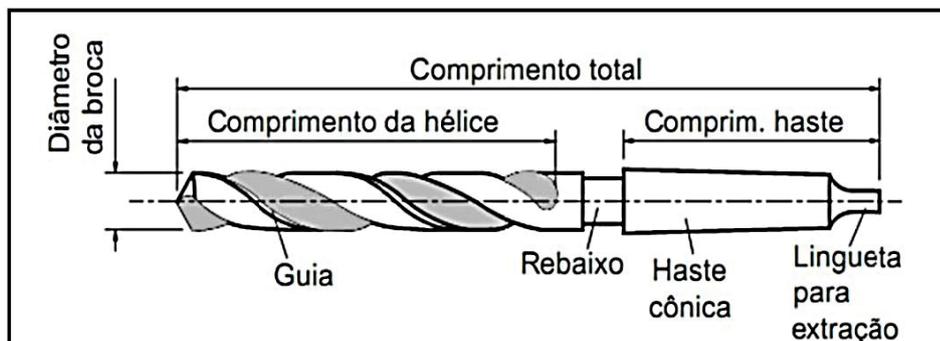


Fonte: Adaptado de BORDIN (2013).

### 3.2.1.1 Geometria de Brocas Helicoidais

De uma forma geral, a broca helicoidal é composta de uma haste e uma parte cortante, conforme mostra a Figura 3.5. Porém, a broca helicoidal apresenta uma geometria bastante complexa, principalmente na parte dos gumes (SCHROETER, 2009).

Figura 3.5 – Geometria básica de uma broca helicoidal

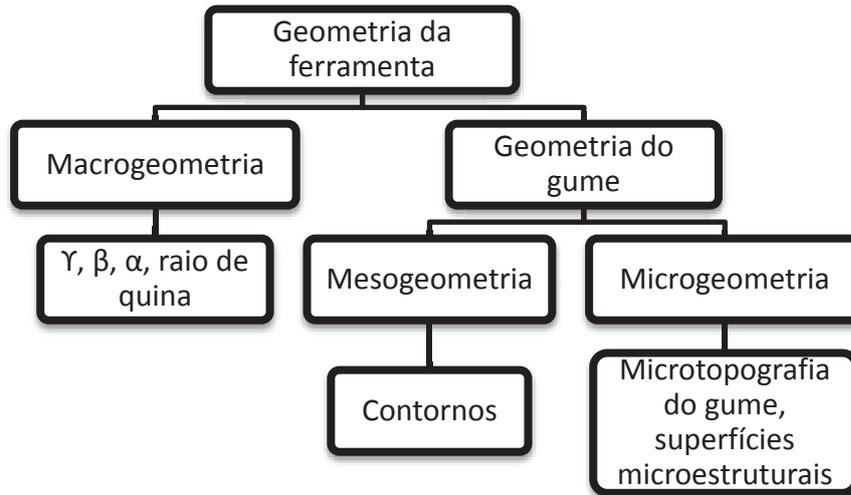


Fonte: Adaptado de SCHROETER (2009).

A geometria da ponta da ferramenta, afeta praticamente todas as variáveis do processo de usinagem, tais como: distribuição de temperatura, vida da ferramenta, acabamento superficial e tensão residual (SOUZA *et al.*, 2014).

Segundo Rodriguez (2009) a divisão da geometria de uma ferramenta de corte pode ser descrita como: macrogeometria e geometria do gume (mesogeometria e microgeometria), conforme ilustra a Figura 3.6.

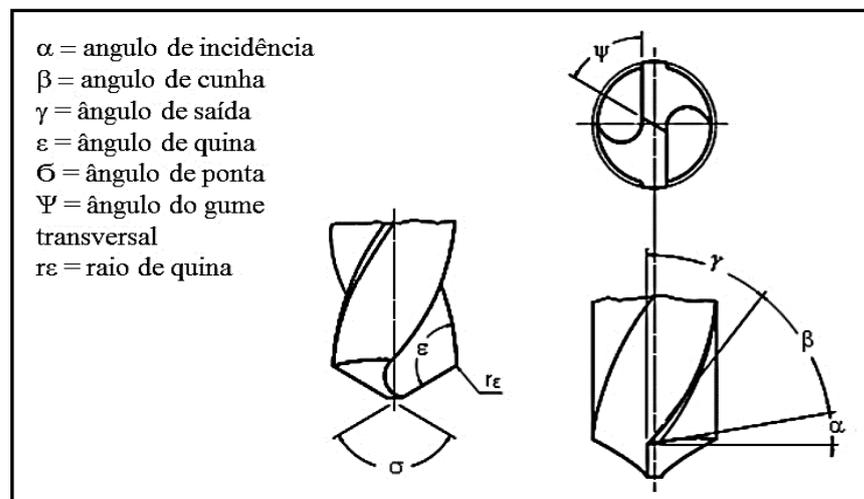
Figura 3.6 – Divisão da geometria de uma broca helicoidal em macrogeometria e geometria do gume



Fonte: Adaptado de BORDIN (2013).

A macrogeometria pode ser definida como os ângulos de corte, raios de quina e outras características geométricas que estão relacionadas com o corte e escoamento do cavaco, conforme ilustrado de forma resumida, na Figura 3.7.

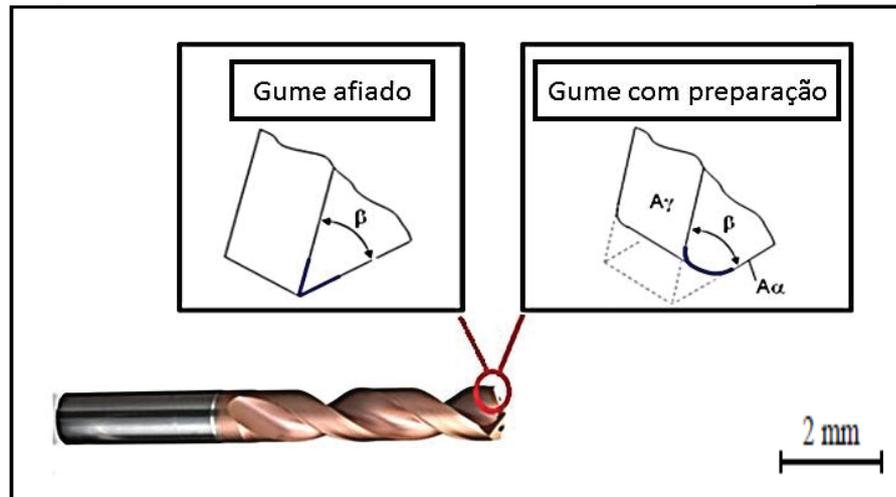
Figura 3.7 – Macro geometria de uma broca helicoidal



Fonte: Adaptado de TUSSET (2015).

A mesogeometria representa os contornos os quais descrevem as superfícies do gume, estas podem ser arredondadas, chanfradas ou ambos. Porém, se a superfície for arredondada (contornos convexos) estas não possuem a forma de um arco circunferencial perfeito (RODRIGUEZ, 2009; BORDIN, 2013). A Figura 3.8 ilustra a mesogeometria de uma broca helicoidal, apresentando uma geometria de gume afiada e uma geometria de gume com arredondamento de aresta.

Figura 3.8 – Mesogeometria de uma broca helicoidal

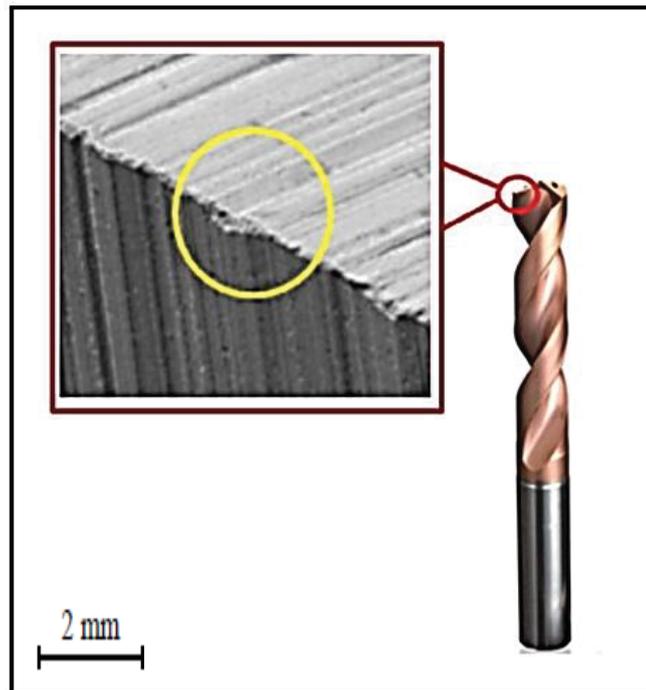


Fonte: Adaptado de BORDIN (2013).

A microgeometria inclui a microtopografia superfícies de flanco, face e guias nas suas interseções. A microtopografia pode ser caracterizada por marcas deixadas na ferramenta, a qual apresenta microlascamentos, entalhes, marcas de rebolo decorrentes dos processos de fabricação, afiação e reafiação das brocas. Nestas superfícies os valores de rugosidade são geralmente altos reduzindo a vida da ferramenta (STEPIEN, 2010; BORDIN, 2013).

Rodriguez (2009), considera as irregularidades na microtopografia do gume como sendo entalhes, oriundos do processo de fabricação. Tais irregularidades podem apresentar influência negativa na resistência do substrato do material da ferramenta, na distribuição estrutural, no tamanho e na morfologia de carbonetos e nas propriedades mecânicas e térmicas da ferramenta. A Figura 3.9 ilustra a microtopografia do gume, com lascamentos e marcas de rebolo, os quais são podem ser decorrentes do processo de fabricação.

Figura 3.9 – Microtopografia de aresta de corte mostrando marcas deixadas pelo processo de retificação



Fonte: Adaptado de RODRIGUEZ (2009).

### 3.2.1.2 Substrato e Revestimento

As brocas de metal-duro apresentam uma grande aplicação na indústria metal mecânica. Estes materiais são um produto da metalurgia do pó feito de partículas duras, divididas em carbonetos e metais refratários, sinterizados com um ou mais metais do grupo de ferro (níquel, cobalto) formando um corpo de alta dureza à compressão. As partículas duras geralmente são de carboneto de tungstênio (WC) ou carboneto de titânio (TiC), carboneto de tântalo (TaC), carboneto de nióbio (NbC) e a parte dúctil é composta geralmente por ligantes metálicos como cobalto (Co) ou níquel (Ni) (DINIZ *et al.*, 2013).

O metal-duro apresenta um conjunto de propriedades como; uma boa distribuição estrutural, dureza elevada, resistência à compressão e ao desgaste (altas temperaturas) (PAGGETT, 2005). Estas propriedades dependem da quantidade, da forma e tamanho dos carbonetos. Quanto mais fino os carbonetos, maior será a tenacidade (resistência ao choque) da ferramenta, aliada a uma certa resistência ao calor (dureza); também a condutividade térmica diminui quando os grãos são menores, fazendo com que o calor gerado pelo corte não se concentre na ferramenta, sendo possível aplicações em condições de instabilidade do processo e cortes mais precisos (CASTILLO, 2005; MACHADO *et al.*, 2011a).

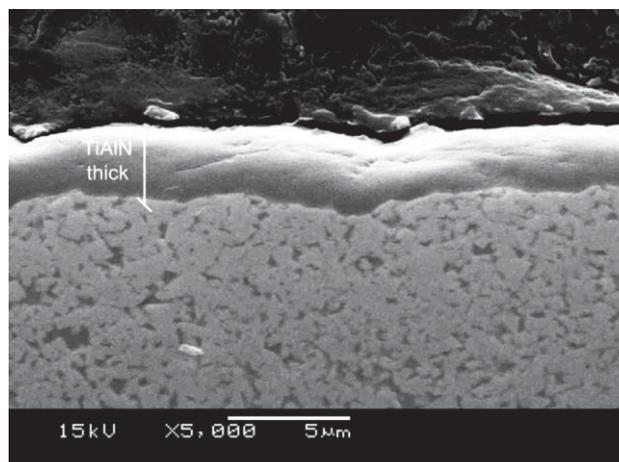
Os revestimentos têm normalmente uma dureza maior que a própria ferramenta, com o objetivo de melhorar as propriedades de resistência ao desgaste abrasivo e químico. Estas camadas de revestimento têm apresentado uma melhora significativa na resistência ao desgaste da camada externa durante o contato cavaco/peça, sendo que o substrato mantém a tenacidade característica do metal duro e, em muitos casos, melhora a vida da ferramenta, diminuindo os esforços de corte e por consequência aumentando a produtividade (DINIZ *et al.*, 2013; SOUZA *et al.*, 2014).

Existem diversos tipos de revestimento, cada um com sua peculiaridade. Os mais usuais são: carboneto de titânio (TiC), nitreto de titânio (TiN), carbonitreto de titânio (TiCN), nitreto de titânio-alumínio (TiAlN) e nitreto de cromo-alumínio (AlCrN), cujo detalhamento não é o objetivo deste trabalho.

No processo de deposição, partes dos átomos de titânio são substituídas por átomos de alumínio; estes átomos são retidos no revestimento na forma de solução sólida, o que causa o endurecimento desta camada. Sua dureza pode chegar a 3.500 HV, o que proporciona mais resistência ao desgaste. O revestimento de TiAlN, tem apresentado resultados significativos na furação com Fluido de corte e na furação a seco, em algumas aplicações (CASTILLO, 2005).

A cobertura de TiAlN é aplicada pelo processo PVD, o que promove coberturas mais finas. As principais características desta cobertura são: maior resistência a oxidação (permite o uso em temperaturas maiores), baixa condutividade térmica, alta dureza a quente, alta estabilidade química (o que reduz o desgaste de cratera) e redução do coeficiente de atrito (DINIZ *et al.*, 2013). A Figura 3.10 ilustra o revestimento de TiAlN.

Figura 3.10 – Esquema do revestimento de Nitreto de titânio-alumínio (TiAlN)



Fonte: PINTAUDE *et al.* (2011).

### 3.2.2 Usinagem com Variação de Fluido Lubrificador

A usinagem utilizando meios lubrificantes, sistemas de mínima quantidade de lubrificante (MQL) e usinagem totalmente sem Fluido tem sido um tema muito debatido entre pesquisadores de todo o mundo.

Contudo, as tendências mundiais na área de usinagem apontam para uma redução ou eliminação total dos fluidos lubrificantes (quando possível) devidos a custos adicionais e problemas relacionados à saúde dos trabalhadores.

A utilização de usinagem a seco (sem fluido) também é uma possibilidade. Porém, este sistema não consiste simplesmente em interromper a alimentação do fluido, esta decisão precisa de uma avaliação criteriosa de todos os fatores envolvidos. Como exemplo, pode-se citar o atrito e a adesão entre ferramenta/cavaco/peça; nestas situações há um aumento da carga térmica envolvida no corte, o que potencializa o desgaste da ferramenta e trazem problemas especialmente ao processo de furação (KLOCKE, 2011).

Uma alternativa para minimizar a quantidade de óleos utilizados em emulsões seria a técnica MQL que apresenta uma microlubrificação na região de corte (ANSHU *et al.*, 2009; BURTON *et al.*, 2014).

Outras técnicas de refrigeração estão sendo amplamente estudadas, como técnicas de refrigeração criogênicas, refrigerações utilizando nanofluidos, HPC (*high pressure coolant*) entre outras, sendo que cada técnica apresenta suas limitações (SHARMA e SIDHU, 2014).

#### 3.2.2.1 Furação em Abundância (Emulsão)

A usinagem com Fluidos lubrificantes traz uma série de benefícios para os processos de corte, pois auxiliam na lubrificação e refrigeração da interface cavaco/ferramenta/peça, melhoram a vida útil da ferramenta e reduzem a estabilidade do processo (CUNHA *et al.*, 2014; BURTON *et al.*, 2014).

Porém, a utilização de fluidos de corte em abundância traz outros inconvenientes, tais como: aspectos ecológicos (preservação do meio ambiente), aspectos econômicos (custos de compra e manutenção) e problemas relacionados à saúde dos trabalhadores próximos às áreas de usinagem (ZHANG *et al.*, 2012; LAWAL *et al.*, 2012).

A Tabela 3.1 ilustra resumidamente algumas atividades, alguns aspectos ambientais e seus respectivos impactos ao meio ambiente.

Tabela 3.1 - Riscos ambientais decorrentes do uso de Fluidos lubrificantes na usinagem

<i>Atividade</i>	<i>Aspectos Ambientais</i>	<i>Impacto no Ambiente</i>
Armazenagem	Vazamento de resíduos	Poluição do solo e subsolo
Preparação do Fluido de corte	Contato com a pele, inalação	Doenças respiratórias
Transporte e descarte de cavaco	Vazamento de Fluido em terrenos	Contaminação do solo
Transporte e descarte do Fluido	Eliminação em locais não autorizado	Contaminação de rios e nascentes
Composição química do Fluido	Aditivos, fungicidas e bactericidas	Causadores de doenças

Fonte: Adaptado de KLAUBERG (2008).

Özçelik *et al.*, (2011) e Lawal *et al.*, (2012) enfatizam que as leis ambientais atuais para a utilização de fluidos de corte são um reflexo das mudanças no comportamento da sociedade contra os danos causados ao meio ambiente e a saúde dos trabalhadores. Esta conscientização provocou rigorosas mudanças nas leis ambientais principalmente no uso de fluidos a base de óleo mineral.

O Instituto Nacional de Segurança e Saúde Ocupacional dos EUA, órgão que é responsável por pesquisas na área de prevenção de lesões e doenças relacionadas com o trabalho, estimou que 1,2 milhões de trabalhadores estão expostos anualmente a doenças relacionadas com a utilização de fluidos de corte usado em usinagem, principalmente doenças respiratórias, mesmo com mudanças na composição dos fluidos e reduções consideráveis nos contaminantes utilizados (BURTON *et al.*, 2014).

Os fluidos são utilizados em grandes quantidades para aumentar a vida das ferramentas e melhorar a qualidade das peças produzidas. Conseqüentemente, sua utilização poderá aumentar os custos globais de produção em até 17% (GHIOTTI *et al.*, 2014).

### 3.2.2.2 Furação com Mínima Quantidade de Lubrificante (MQL)

O objetivo da utilização do sistema MQL é aplicar uma quantidade mínima de óleo na região de corte com o intuito de reduzir as forças envolvidas, o atrito e, se possível, auxiliar na redução das altas temperaturas geradas no processo. Além disso, em decorrência destas

reduções, aumentar a vida útil da ferramenta, melhorando o acabamento superficial das peças usinadas (ANSHU *et al.*, 2009; BURTON *et al.*, 2014).

Mínima quantidade de lubrificante é o nome dado ao procedimento de pulverizar uma pequena quantidade de óleo (geralmente abaixo de 100 ml/h) através de um fluxo de ar pressurizado. O sistema MQL caracteriza-se por utilizar jatos de ar pressurizados, que se impactam contra as gotas de óleo, fragmentando-se e formando uma mistura chamada de “*spray*”. Esta mistura é conduzida por meio de tubulações até o furo de refrigeração interna do mancal e do mandril-ferramenta ou a bicos externos. Quando a mistura óleo/ar sai da tubulação, o fluxo sofre uma expansão rápida, atingindo a superfície de corte (gumes da ferramenta), contribuindo para a lubrificação da peça usinada (WEINERT *et al.*, 2004; ANSHU *et al.*, 2009; LAWAL *et al.*, 2013).

Contudo, há algumas variáveis que podem interferir diretamente na qualidade do processo que utiliza o sistema MQL: a forma de aplicação do Fluido (interna à ferramenta ou por bicos externos) e a relação da mistura óleo/ar (ZEILMANN, 2003).

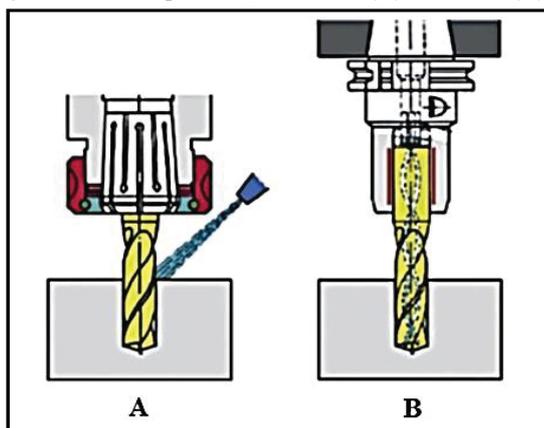
O calor gerado durante a usinagem com mínima quantidade de lubrificante é considerado intermediário entre a usinagem com abundância e totalmente a seco. Como o sistema MQL apresenta boa ação lubrificante e pouca ação refrigerante, as altas temperaturas provocadas pela furação podem acelerar os mecanismos de desgaste da ferramenta, reduzindo sua vida útil. Outra característica deste procedimento refere-se às altas temperaturas durante o corte, o que pode causar dilatações térmicas na região usinada, podendo gerar variações dimensionais (WEINERT *et al.*, 2004).

A Figura 3.11 apresenta uma ilustração da aplicação do Fluido por MQL. Em “A” ilustra a aplicação de forma externa, e em “B” a aplicação interna pelo centro do fuso da máquina. Cada sistema apresenta suas particularidades e sua escolha deve ser realizada em função do rendimento da operação e da disponibilidade dos dispositivos (LAWAL *et al.*, 2012).

O controle da posição dos bicos externos também contribui para que a mistura óleo/ar consiga atingir maior cobertura possível em relação à profundidade do furo.

A Figura 3.12 representa uma ilustração do posicionamento utilizado para furação de uma liga Ti6Al4V com um único bico externo. Esta combinação dimensional pode variar dependendo da quantidade de bicos externos, de suas posições entre si e das características do material a furar (ZEILMANN, 2003).

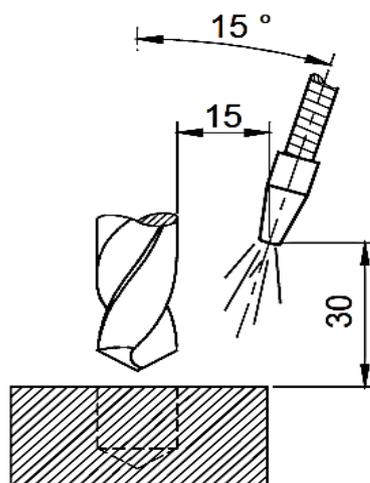
Figura 3.11 - Sistema de aplicação de fluidos por MQL: externa (A) e interna (B)



Fonte: Adaptado de LAWAL *et al.* (2012).

Zeilmann (2003) ilustra o posicionamento do sistema MQL recomendado pela empresa Steidle GmbH (fabricante do dispositivo) para utilização em processo de furação em ligas de titânio.

Figura 3.12 – Posicionamento de um bico externo para sistema MQL na furação de uma liga de Ti6Al4V



Fonte: Adaptado de ZEILMANN (2003).

Alguns trabalhos mostram benefícios na utilização da técnica de aplicação por mínima quantidade de lubrificante.

Brandão *et al.*, (2011) realizaram um estudo na tentativa de determinar o fluxo de calor e o coeficiente de convecção durante a furação do aço H13 endurecido (45 HRC) utilizando broca inteira de metal-duro com revestimento de TiAlN, diâmetro de 8,5 mm, com diferentes sistemas de lubrificação: (MQL, emulsão e a seco). A aplicação dos fluidos foi realizada

por bicos externos com vazão de 20 ml/h e 200 l/h respectivamente, ambos com óleo à base mineral. Os autores concluíram que a redução de temperatura é proporcional à quantidade de Fluido aplicado, o qual se apresentou mais significativo no sistema MQL em relação ao corte a seco.

Rahim e Sasahara (2011) analisaram a furação de uma liga de Ti6Al4V sobre diferentes sistemas de lubrificação (MQL com óleo vegetal, sintético, emulsão em abundância e ar comprimido) com brocas de metal duro revestidas com TiAlN com foco na avaliação das forças de corte, da temperatura, da potência e da energia específica de corte. Os autores concluíram que o sistema com aplicação em MQL apresenta um desempenho similar ao sistema em abundância, sendo o fato explicado pela formação de uma película de lubrificante na interface ferramenta/peça, o que reduziu o atrito entre as partes e consequentemente o calor gerado no corte.

Biermann *et al.*, (2012b), avaliaram os aspectos térmicos na furação profunda de alumínio utilizando broca helicoidal e sistema por MQL. As investigações mostraram que o avanço é o principal fator de aumento das cargas térmicas e mecânicas. Quanto menor for o avanço maior será o calor gerado na peça. Nesta aplicação, o sistema MQL pode auxiliar apenas na redução do atrito gerado (lubrificação) e o fluxo de ar pode contribuir para minimizar a temperatura da região de corte.

Porém, a utilização do sistema MQL pode trazer alguns inconvenientes relacionados ao ambiente de trabalho e a saúde dos operadores: a pulverização da mistura óleo/ar levanta no ambiente de trabalho uma névoa de pequenas partículas de óleo; esta mistura pode ser prejudicial à saúde, e para evitar este problema as maquina precisam estar adaptadas com um sistema de exaustão e ser totalmente fechada. Outra preocupação é em relação ao ruído emitido pela linha de ar comprimido, o qual pode chegar a 80 db prejudicando a audição (SOUZA, 2011; SARNI, 2011).

O sistema MQL aplicado por bicos externos pode ser comparado em alguns casos com a usinagem completamente sem lubrificante, pois a película de óleo aplicado apresenta um efeito máximo de lubrificação em uma profundidade de 1,5 vezes o diâmetro da broca. Em profundidade maiores o cavaco formado em torno da ferramenta impede uma lubrificação mais eficaz (ZEILMANN, 2003).

### 3.2.2.3 Furação a Seco

A furação a seco (*dry drilling*) atenderia completamente as situações do ponto de vista ambiental e de saúde dos operadores pela completa eliminação dos fluídos de corte. Porém, com a retirada do meio lubrificante, as propriedades primárias (lubrificação a baixas velocidades de corte, refrigeração a altas velocidades de corte, remoção dos cavacos na zona de corte, proteção da máquina ferramenta e da peça contra oxidação) ficam comprometidas, ocorrendo um aumento gradual do calor, devido ao atrito gerado no processo de furação (MACHADO *et al.*, 2011b).

Contudo, faz-se necessária uma avaliação mais rigorosa da região de contato ferramenta/peça, no intuito de verificar possíveis alterações de deformações plásticas e perfil de dureza devido à severidade do processo a seco. Para auxiliar neste sentido, estão em pleno desenvolvimento ferramentas e revestimentos capazes de reduzir as cargas térmicas e diminuir o atrito e a adesão na interface da peça/ferramenta (HEILER *et al.*, 2011; KLOCKE, 2011).

A eliminação total ou redução da quantidade de Fluido lubrificante representa maior atrito entre as partes envolvidas no corte e temperaturas mais elevadas na região do corte, o que contribui para o desgaste da ferramenta, prejudicando a qualidade superficial da peça usinada. Existem trabalhos na literatura que apresentam resultados satisfatórios em relação a usinagem a seco, principalmente em fresamento, torneamento externo em materiais ferrosos, ligas leves e materiais endurecidos (LÓPEZ DE LACALLE *et al.*, 2011; KLOCKE, 2011; SUGIHARA *et al.*, 2014).

### 3.2.3 Variação da Mesogeometria das Ferramentas

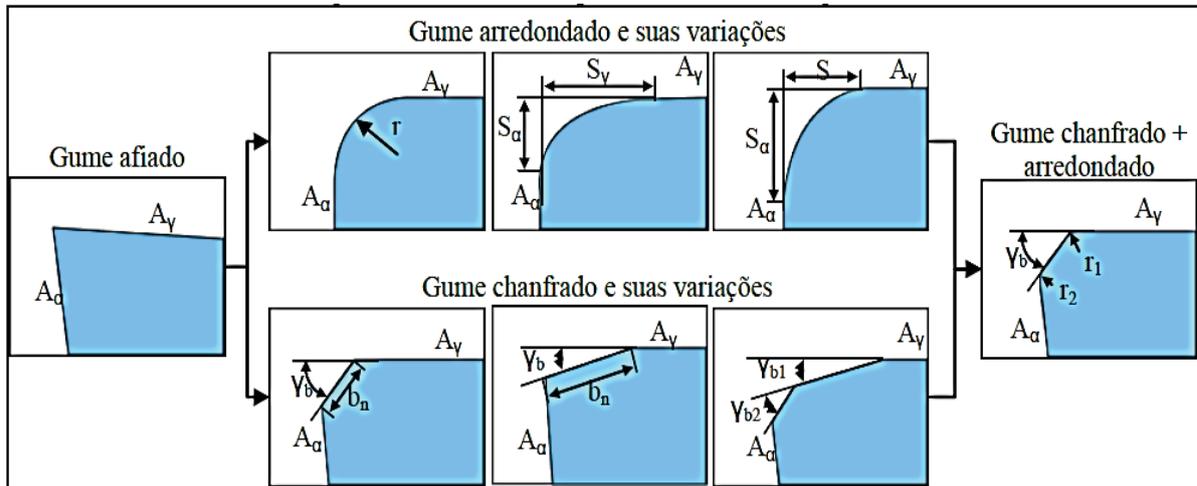
Alguns pesquisadores e fabricantes de ferramenta de corte têm estudado os efeitos da modificação da mesogeometria nos processos de usinagem. Arredondamentos, chanfros ou ambos são considerados alternativas para promover um aumento da resistência mecânica dos gumes e com isto, um aumento significativo na vida útil das ferramentas e por consequência redução dos custos de operação (TUSSET *et al.*, 2016).

### 3.2.3.1 Mesogeometria de Ferramentas de Corte

Algumas pesquisas estão sendo direcionadas para a avaliação da modificação da mesogeometria das ferramentas. Estas modificações tendem a aumentar a resistência mecânica dos gumes, dando mais estabilidade durante a usinagem, melhorando a textura das superfícies da ferramenta nas interfaces entre face/flanco, guias e quinas (BORDIN, 2013).

Alguns parâmetros devem ser levados em consideração na escolha da modificação na microgeometria da ferramenta: geometria primária do gume, processo de usinagem, efeitos do tamanho e aspecto da microusinagem, material da peça e revestimento (TUSSET *et al.*, 2016). A Figura 3.13 mostra uma ilustração das diferentes condições da mesogeometria de uma aresta de corte, com geometria afiada, arredondadas, chanfradas ou ambas.

Figura 3.13 – Representação das diferentes mesogeometrias de corte



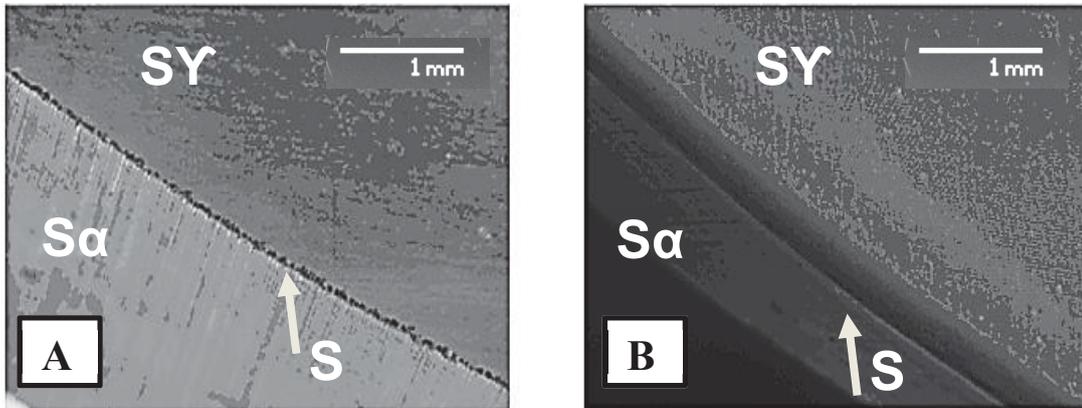
Fonte: Adaptado de BORDIN (2013).

A vida da ferramenta e seu desempenho podem ser influenciados pela geometria das partes cortantes. Um exemplo de modificação da mesogeometria é o arredondamento destas regiões que podem aumentar a resistência dos gumes, prolongando a vida útil da ferramenta. Estas alterações proporcionam uma furação mais estável, contribuem para a redução dos defeitos na superfície da ferramenta causados pelos microlascamentos remanescentes dos processos de fabricação da ferramenta. Tais modificações refletem-se na qualidade superficial da peça usinada (RODRIGUEZ, 2009; WOLF *et al.*, 2012; BIERMANN e DENKENA, 2014).

Para ilustrar esta modificação a Figura 3.14 retrata duas imagens de gumes de uma broca: em “A” o gume sem preparação e em “B” com preparação. Percebe-se em “A” uma rugosidade mais acentuada na cunha, provavelmente em virtude do processo de fabricação, já

bem “B” a mesma superfície com preparação do gume, sem marcas irregulares do processo de retificação.

Figura 3.14 – Aresta de corte sem preparação “A” e com preparação “B”



Fonte: Adaptado de TIKAL (2009).

Geralmente as geometrias arredondadas e chanfradas são utilizadas para corte de precisão, as geometrias apenas arredondadas para acabamento e as geometrias apenas chanfradas para desbaste e cortes interrompidos (RODRIGUEZ, 2009).

Para classificar a geometria foi utilizado um fator de forma  $K$  que relaciona a inclinação da mesogeometria em relação ao ângulo de saída ( $\gamma$ ) e ao ângulo de folga ( $\alpha$ ) em relação à medição das arestas  $S\gamma$  e  $S\alpha$  (FULEMOVA e ZADENEK, 2014). Com isto, tem-se que:

- $K=1$  a mesogeometria é simétrica em relação ao gume;
- $k>1$  a mesogeometria está inclinada na direção da face (superfície de saída);
- $K<1$  a mesogeometria está inclinada na direção do flanco (superfície de folga);

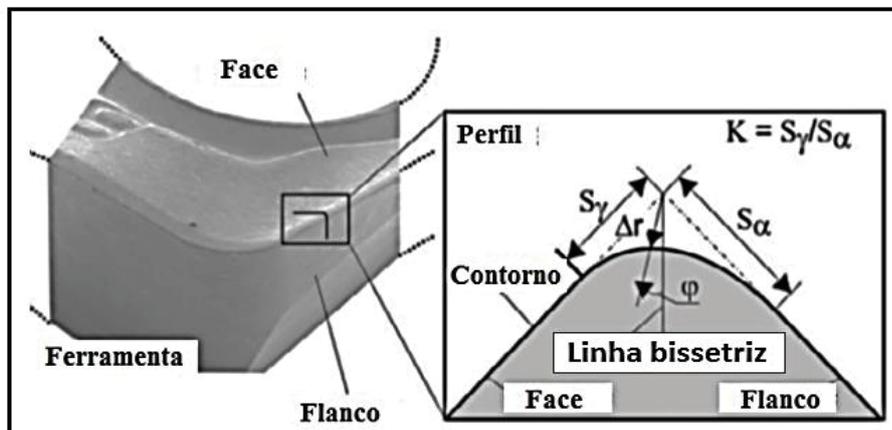
O fator  $K$  é calculado pela dimensão  $S\gamma$  (superfície de saída) dividida pela dimensão da  $S\alpha$  (superfície de folga), conforme Equação (1).

$$K = \frac{S\gamma}{S\alpha} \quad (1)$$

A inclinação da mesogeometria, apresenta influência no desgaste, na vida e no aumento das cargas térmicas e mecânicas sobre a ferramenta. Quando  $K>1$  ( $S\gamma > S\alpha$ ) a deformação à frente do gume é mais acentuada; quando  $K<1$  ( $S\gamma < S\alpha$ ) ocorre deformação, porém em magnitude inferior (DENKENA *et al.*, 2012; BIERMANN E DENKENA, 2014).

Para melhor visualização do fator de forma K, a Figura 3.15 mostra um esquema de medição deste fator.

Figura 3.15 – Esquema de medição do fator de forma K



Fonte: Adaptado de DENKENA *et al.* (2012).

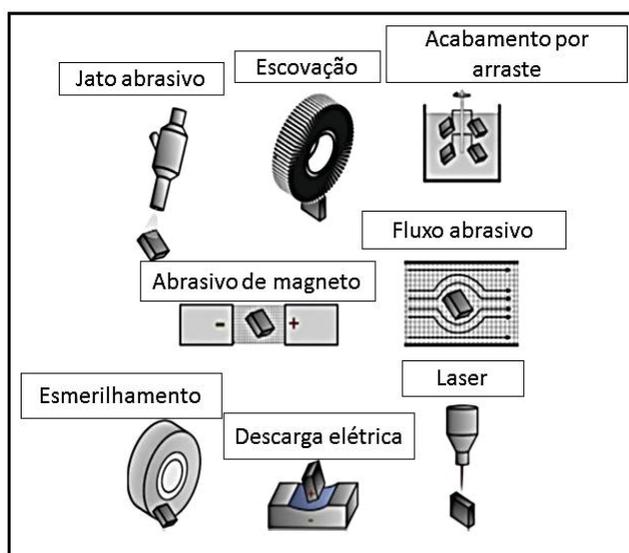
Alguns pesquisadores desenvolveram métodos de caracterização da mesogeometria. Denkena *et al.*, (2002) *apud* Santana e Polli (2015) desenvolveram um método de caracterização do arredondamento dos gumes para insertos, o qual apresenta bases “planas”, sendo um método mais simples de medição. Já a aplicação em brocas helicoidais mostra uma certa incerteza nas medições devido ao fato da ferramenta não apresentar geometria regular ao longo dos gumes.

Outro método de medição é descrito por Yussefian e Koshy (2013) que caracteriza o perfil de arredondamento por curvas B-Spline (curva básica definida matematicamente por dois ou mais pontos de controle). Este método apresenta como ponto de referência a ponta da ferramenta e os pontos tangenciais do arredondamento dos gumes. Esta forma de medição apresenta boa precisão e repetibilidade das curvas sobre os gumes arredondadas.

### 3.2.3.2 Métodos para Modificação das Mesogeometrias

A produção das geometrias com alteração de gumes precisa ser reprodutiva para manter suas vantagens técnicas e econômicas. Existem atualmente diversas tecnologias de processamento, os quais tem o objetivo de remover material para produzir a geometria específica e topografia desejada. A Figura 3.16 mostra alguns processos de modificação dos gumes, porém, os processos mecânicos ainda são os mais utilizados (RODRIGUEZ, 2009; BIERMANN e DENKENA, 2014).

Figura 3.16 – Métodos de modificação da mesogeometria



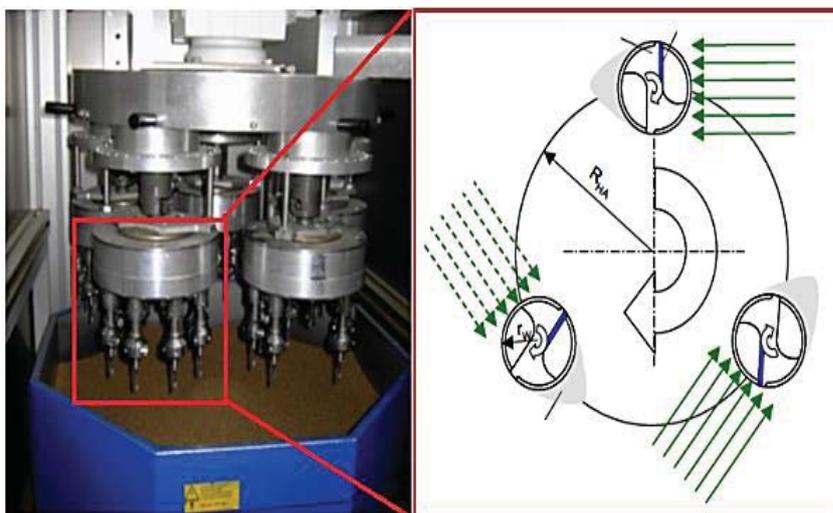
Fonte: Adaptado de Biermann e Denkena (2014).

### 3.2.3.3 Processo Mecânico de Acabamento por Arraste

O termo acabamento por arraste (*drag finishing*) é um processo de suavização de arestas por meio de partículas abrasivas, sendo uma operação alternativa de acabamento das superfícies. Este processo é aplicado em arredondamentos de gumes de ferramentas de corte, polimentos de válvulas, peças automotivas, aeronáuticas, dispositivos médicos (TAGLIAFERRI *et al.*, 2014). Esta operação assemelha-se ao processo de lapidação mecânica por meio abrasivo que é utilizado para modificação de geometrias em peças mecânicas (SOUZA, 2011).

O equipamento utilizado para o processo é geralmente um carrossel planetário, em que a peça (ferramenta) é fixada e mergulhada em meio abrasivo (geralmente partículas abrasivas de cerâmica, carboneto de silício e quartzo) o qual gira em seu próprio eixo durante o processo. O movimento rotatório alterna em sentido horário e anti-horário, fazendo com que o arredondamento ocorra em todas as superfícies da ferramenta. A Figura 3.17 representa uma máquina utilizada para realizar o acabamento por arraste e uma ilustração dos movimentos cinemáticos realizados pelo porta-ferramenta (RISSE, 2006; TAGLIAFERRI *et al.*, 2014; BIERMANN e DENKENA, 2014).

Figura 3.17 – Esquema de movimentação das ferramentas no acabamento por arraste

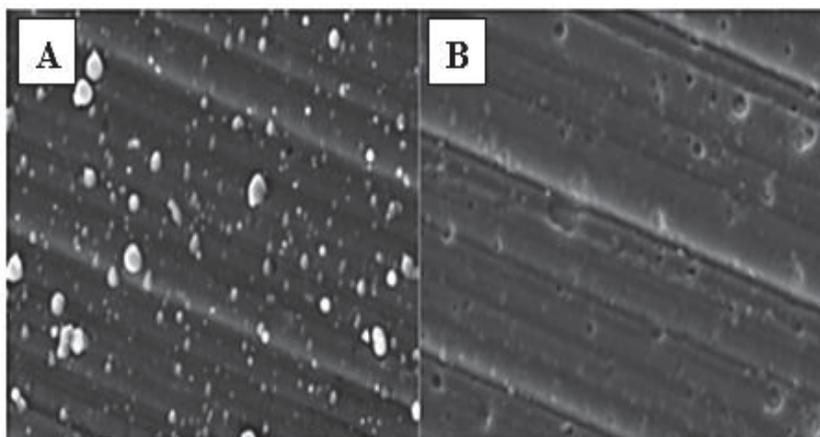


Fonte: Adaptado de SETTINERI *et al.* (2012).

Alguns estudos mostram os meios abrasivos utilizados (granulados de SiC, Cu/Zn, são mencionados em testes). Porém, para cada grau de arredondamento dos gumes são utilizados elementos abrasivos diferentes. O tempo de exposição da ferramenta depende de simulações e estudos empíricos (SETTINERI *et al.*, 2012, BARLETTA *et al.*, 2015).

O acabamento por arraste pode ser utilizado após as ferramentas passarem pelo processo de revestimento. Este processo contribui para a remoção de materiais acumulados na superfície da ferramenta após a cobertura com o revestimento e reduzirá o atrito entre as partículas mais duras aglomeradas e a superfície do material usinado (TIKAL 2009; BORDIN, 2013; TUSSET, 2015). A Figura 3.18 mostra os efeitos do acabamento por arraste sobre a superfície da ferramenta, em “A” sem acabamento e em “B” com acabamento.

Figura 3.18 - Efeitos do acabamento por arraste após o revestimento da ferramenta



Fonte: Adaptado de TIKAL (2009).

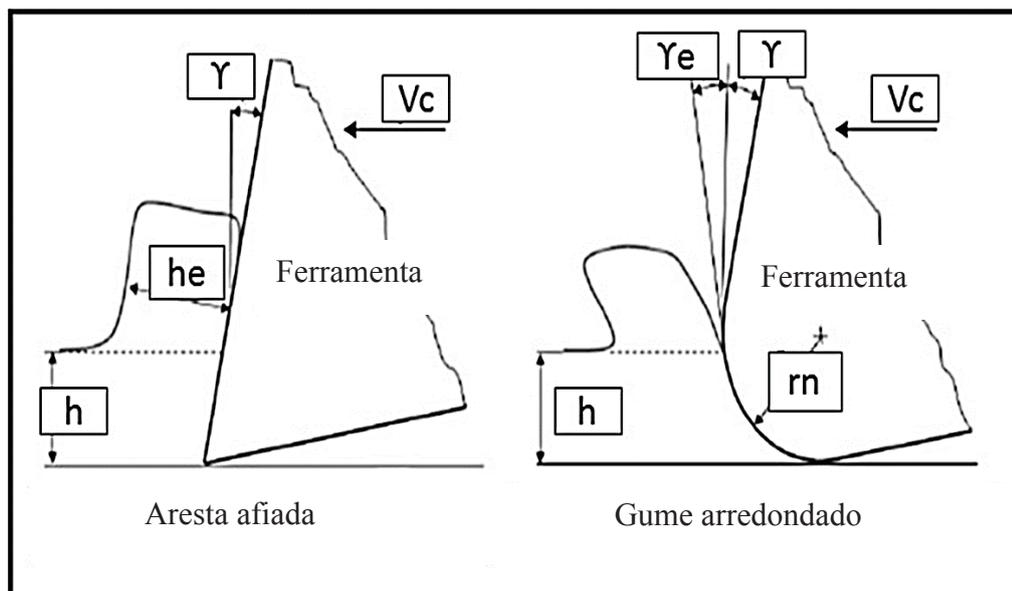
### 3.2.3.4 Efeitos do Acabamento por Arraste na Superfície Usinada

O arredondamento do gume afeta significativamente a mecânica do corte e altera as cargas térmicas durante a remoção de material. Por consequência, o desempenho das ferramentas pode sofrer alterações (KLOCKE *et al.*, 2014).

Biermann *et al.* (2012b) citam que o arredondamento do gume potencializa o efeito de sulcamento (*ploughing*) no processo de furação. *Ploughing* é um termo em inglês que significa que parte do material deformado na frente da cunha tenderá a escoar plasticamente para os lados do gume; assim, a remoção deste material formará rebarbas que deformarão lateralmente, podendo partes deste material serem plastificadas sobre a superfície usinada. Esta deformação plástica à frente do gume pode causar uma elevação da rugosidade, aumento da dureza por encruamento e até erros dimensionais em alguns casos (BIERMANN e DENKENA, 2014).

Quando a espessura ( $h$ ) do cavaco ainda não cisalhado for da mesma ordem do raio de arredondamento do gume ( $r_n$ ) ou menor, formará um ângulo negativo de saída ( $\gamma_e$ ), aumentando as forças de corte e dificultando a remoção do cavaco. Este fato é independente dos ângulos nominais da ferramenta ( $\gamma$ ) (RODRIGUEZ, 2009; ZEILMANN *et al.*, 2013; OLIVEIRA *et al.*, 2015). A Figura 3.19 ilustra estas alterações.

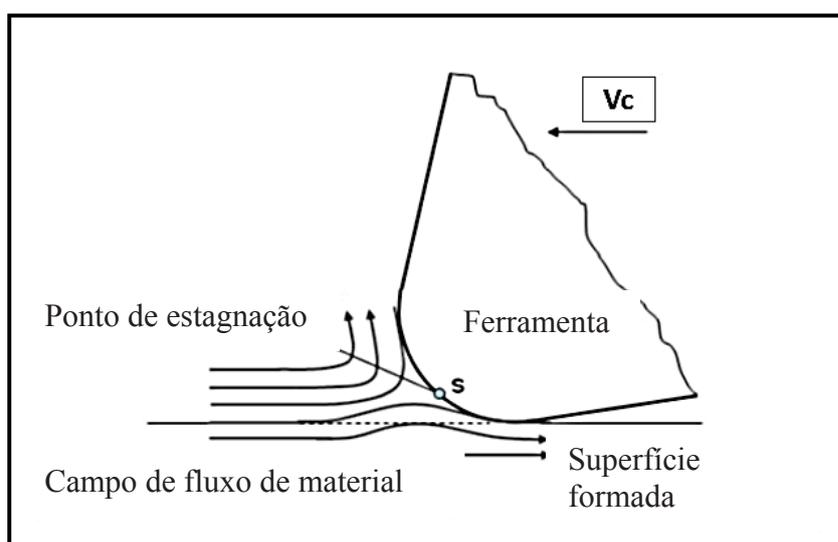
Figura 3.19 - Alterações teóricas sobre a geometria do gume, representando uma aresta afiada e o gume arredondado



Fonte: Adaptado BORDIN (2013).

O efeito *ploughing* pode ser resultante da fração da espessura de cavaco não deformado abaixo de um ponto chamado de estagnação (S). Acima deste ponto, o material flui formando o cavaco, enquanto que abaixo do ponto de estagnação o material formará a superfície usinada. As alterações no fluxo de material sobre o gume da ferramenta promovem um aumento substancial da temperatura e da força de avanço. No *ploughing*, tanto maior for a deflexão à frente do gume, maiores serão os efeitos causados sobre as variáveis do processo. Além disso, a altura deste ponto tem grande influência sobre o escoamento do cavaco (RODRIGUEZ, 2009; DENKENA *et al.*, 2012; BORDIN, 2013). A Figura 3.20 representa esta condição.

Figura 3.20 - Representação do ponto de estagnação do gume arredondado

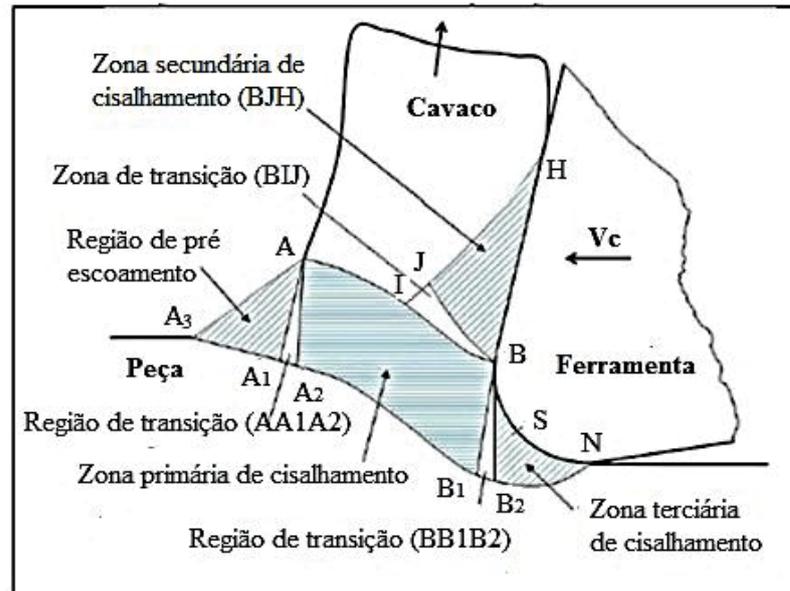


Fonte: Adaptado de TUSSET (2015).

Porém, em algumas situações, o efeito de sulcamento pode se mostrar benéfico, pois torna o processo de corte mais estável (com menor vibração) (CHOU e SONG, 2004; ÖZEL *et al.*, 2008; BURHANUDDIN *et al.*, 2011).

Rodriguez (2009) atribui teoricamente que a mecânica do corte para gumes arredondados apresenta 3(três) regiões de cisalhamento. A deformação do material ocorre na zona identificada como (AIB, B1A2A1A3A) região de cisalhamento primário, a segunda região formada por (B, N, B2) e identificada como zona secundária de cisalhamento e a terceira região formada por (J, B, H), estas regiões são identificadas como conforme representação da Figura 3.21.

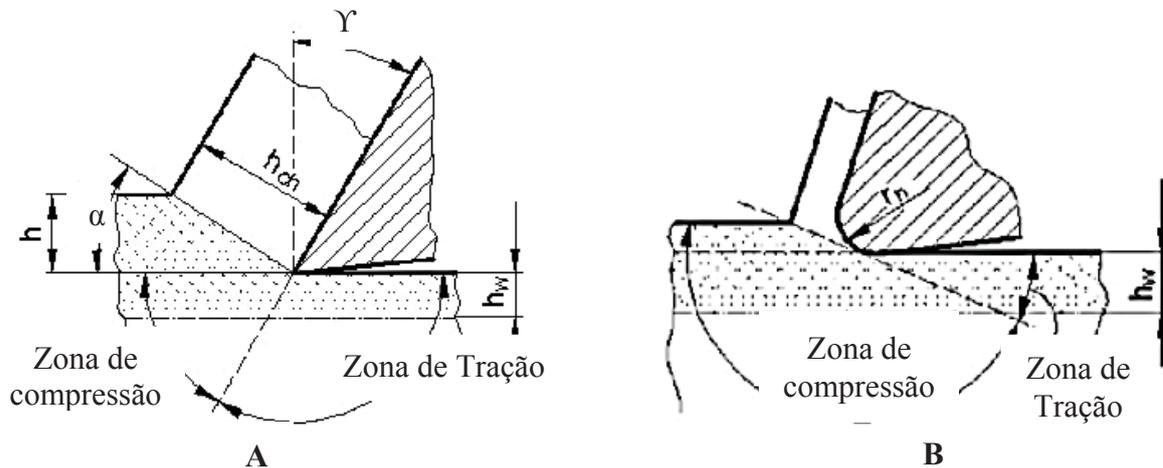
Figura 3.21 – Esquema de corte para gumes arredondados representando as zonas de cisalhamento



Fonte: Adaptado de BORDIN (2013).

Os gumes sem arredondamento e arredondados promovem uma região de tensão de compressão e tração em sua frente (DAVIM, 2010). A Figura 3.22 representa estas zonas, à frente da aresta afiada em “A” e à frente de um gume arredondado em “B”.

Figura 3.22 – Representação das zonas de tensão de compressão e tração



Fonte: Adaptado de Davim, (2010).

A extensão (profundidade) abrangida pela tensão (compressão ou tração) abaixo da superfície usinada pode variar gradualmente, dependendo do material a ser cortado, da

geometria da ferramenta e das condições de corte, incluindo a presença ou ausência de um lubrificante (DAVIM, 2010).

Com a ação do corte pela ferramenta arredondada (modificada), porções de material são comprimidas pela superfície de folga, parte da região usinada recupera-se elasticamente e outra porção sofre deformação plástica em uma direção perpendicular ao movimento da ferramenta sem apresentar separação da peça. Esse fenômeno é chamado de fluxo lateral do cavaco e se apresenta similar ao sulcamento, onde partes do material (cavaco) são removidos e partes ficam aderidos na superfície usinada, o que pode prejudicar o acabamento (MACHADO *et al.*, 2011b).

Há trabalhos referentes aos efeitos causados pelo arredondamento dos gumes. Porém, suas conclusões são parcialmente contraditórias e faltam requisitos para um completo entendimento das interações sobre as propriedades do corte e a integridade da superfície (KNAPP *et al.*, 2012).

### **3.3 Integridade Superficial (I.S)**

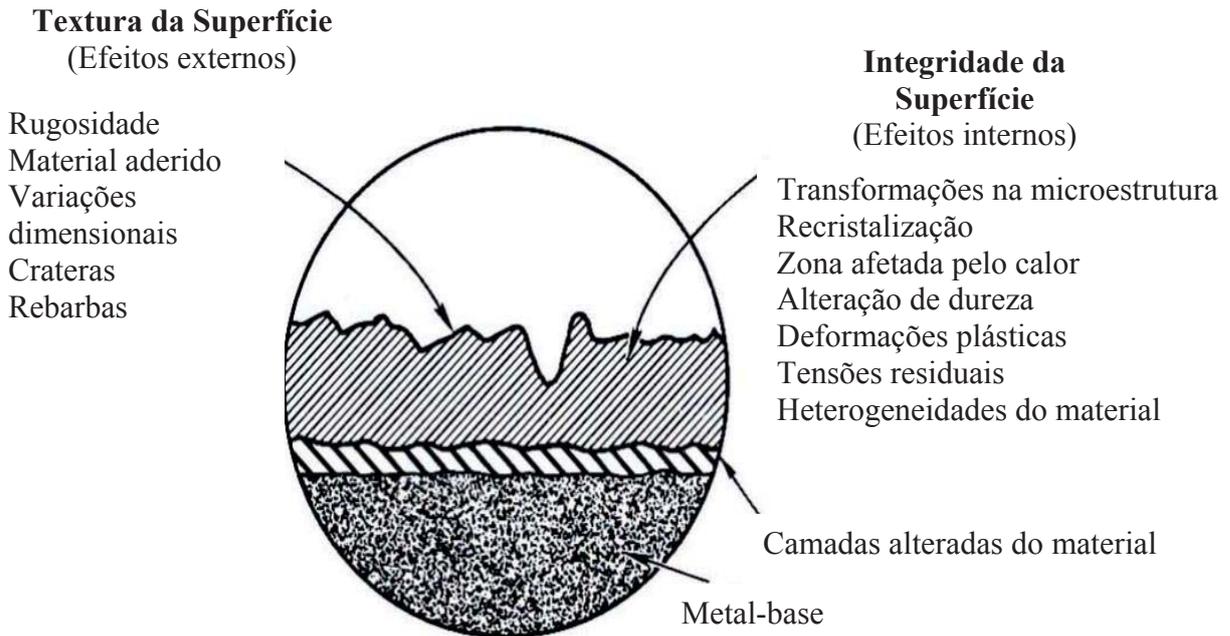
A definição do termo integridade superficial (I.S) é um tema amplo e complexo, sujeito a interpretações. Para um completo entendimento, é necessário um estudo sobre uma área da ciência que é definida como “ciência das superfícies”, que estuda as interações entre corpos e seus reflexos nas superfícies em serviço, tais interações podem ser; físicas, químicas, elétricas, mecânicas e térmicas (DAVIM, 2010).

Para o desenvolvimento desta dissertação será dado ênfase ao acabamento superficial de superfícies geradas pelo processo de furação e seus efeitos sobre o material usinado.

De uma maneira geral, acabamento superficial pode ser definido como o conjunto de fatores relacionados a superfície, seja externa (textura) ou interna (integridade) e suas relações com o desempenho funcional de componentes mecânicos (DAVIM, 2010; SOUZA, 2011; MEYER *et al.*, 2011; BORDIN, 2013).

A textura da superfície refere-se as irregularidades na camada externa e a seus efeitos sobre a qualidade das superfícies usinadas. Já a integridade está relacionada com os efeitos internos da peça, alterações metalúrgicas, variação de perfil de dureza, camada afetada pelo calor, entre outras (SOUZA, 2011). A Figura 3.23 representa os elementos superficiais e sub superficiais de uma superfície usinada.

Figura 3.23 – Representação dos elementos superficiais e subsuperficiais



Fonte: Adaptado de ROSARIO (2011).

As condições de usinagem (parâmetros de corte, estado da ferramenta, propriedades do material usinado e da broca, geometria da broca e meio lubrificante) apresentam uma influência direta sobre o acabamento e sobre a vida útil dos componentes mecânicos (BASAVARAJAPPA *et al.*, 2007; LU, 2008).

Peças submetidas ao processo de furação necessitam de acompanhamento, principalmente as que serão utilizadas em rotação, pois se o acabamento superficial for negligenciado, poderão surgir indicadores de pontos de fadiga, principalmente quando a rugosidade, a tensão residual, a camada branca ou a qualquer um dos outros fatores ligados ao acabamento tenham seus valores superiores às tolerâncias indicadas pelo projeto (SHARMAN *et al.*, 2008; HERBERT *et al.*, 2012).

Portanto, torna-se necessário o entendimento dos fenômenos que influenciam na qualidade superficial das peças usinadas, tornando os processos de usinagem mais previsíveis quanto às possíveis interferências causadas por otimizações do processo.

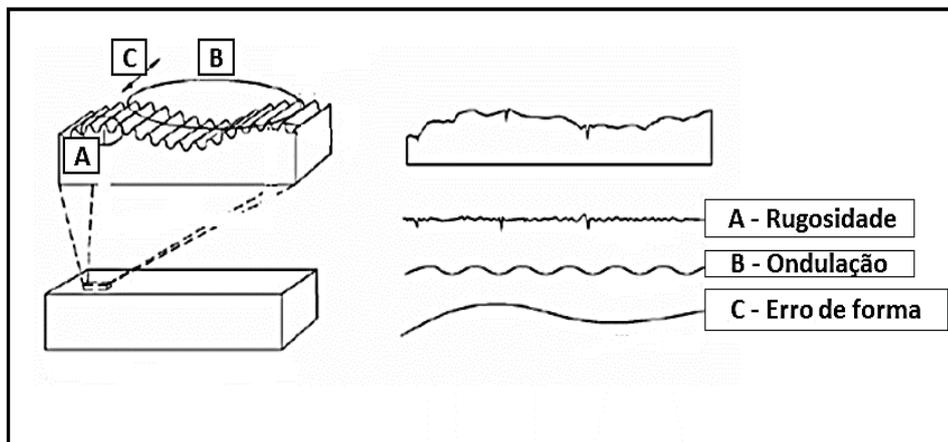
### 3.3.1 Aspectos Superficiais

Nos processos de usinagem é praticamente impossível produzir peças com superfícies isentas de irregularidades. Mesmo espécimes com ótimo acabamento superficial, se submetidas a uma vistoria com auxílio de lupa ou microscópios ópticos, apresentarão sulcos, desvios de forma e até trincas superficiais (KLOCKE, 2011). Estas variações podem ser divididas em erros macro e micro geométricos.

Os erros macro geométricos são caracterizados por desvios geométricos de ondulação, retilidade, planicidade entre outros, os quais podem afetar as dimensões nominais da peça. Estes erros podem ser influenciados pelo material da peça, pela máquina ferramenta, pelo método de usinagem, pela influência dos operadores e do meio ambiente (variação de temperatura). Já os erros micro geométricos são identificados pela rugosidade que são um conjunto de irregularidades (saliências e reentrâncias) observado mediante a utilização de um aparelho eletrônico chamado de rugosímetro (SOUZA, 2011).

Na Figura 3.24 é apresentada de forma resumida a combinação destas variações; em “A” a rugosidade, em “B” a ondulação e em “C” erro de forma.

Figura 3.24 – Exemplos de erros geométricos encontrados em superfície usinada



Fonte: Adaptado de SOUZA (2011).

Dentre os aspectos superficiais, a rugosidade pode ser considerada como um dos mais importantes, pois além de sua influência na resistência à fadiga, seus valores servem como parâmetro de definição de quanto tempo de trabalho deverá ser utilizado para a obtenção do acabamento desejado e quais as ferramentas serão necessárias para tanto; isso terá um reflexo nos custos globais de produção (LU, 2008; MARCHIORI, 2013).

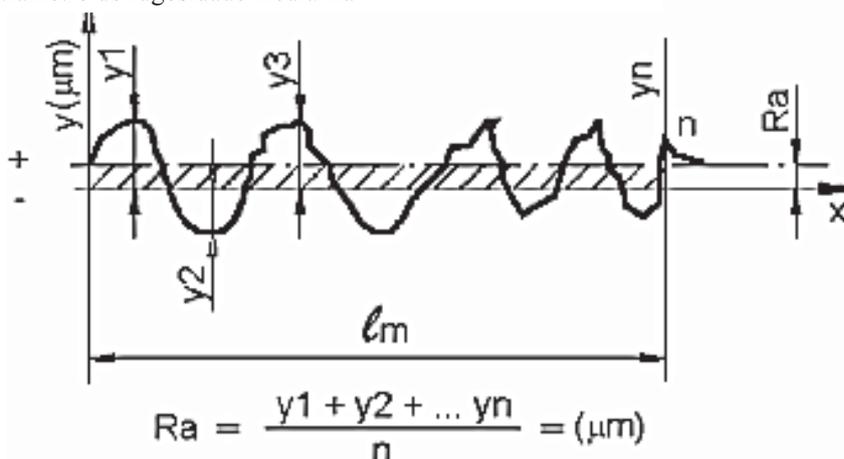
### 3.3.1.1 Rugosidade

Rugosidade pode ser definida como um conjunto de irregularidades presentes em uma superfície real, tendo como parâmetro uma superfície ideal de referência. São saliências e reentrâncias deixadas pelas ferramentas de corte, as quais podem ter relação com velocidade de corte, avanço (principalmente), profundidade de corte entre outras condições (CASTILLO, 2005). A norma utilizada como referência no Brasil é a ABNT NBR 4287 (2002).

O acabamento superficial pode apresentar uma relação com os valores de rugosidade, mesmo que estes não estejam correlacionados de uma forma direta. Porém, as condições tribológicas, a transferência de calor, a resistência oferecida ao escoamento dos fluidos, a qualidade de aderência, a resistência à corrosão, a vedação e a aparência, provavelmente são influenciadas pelas condições dos valores de rugosidade (SOUZA, 2011).

Existem diversos parâmetros de rugosidade, cada um com suas particularidades. Os mais usuais entre os profissionais da área de usinagem é o parâmetro de rugosidade média “Ra” (desvio médio aritmético). Sua utilização pode ser atribuída pela simplicidade dos cálculos e uma aproximação satisfatória dos resultados (MARCHIORI, 2013). Os valores de “Ra” são calculados pela média aritmética dos valores absolutos das ordenadas ( $Y_n$ ) em um comprimento de amostragem ( $l_m$ ). A figura 3.25 representa este parâmetro.

Figura 3.25 – Parâmetro de rugosidade média Ra



Fonte: Adaptado de SOUZA, (2011).

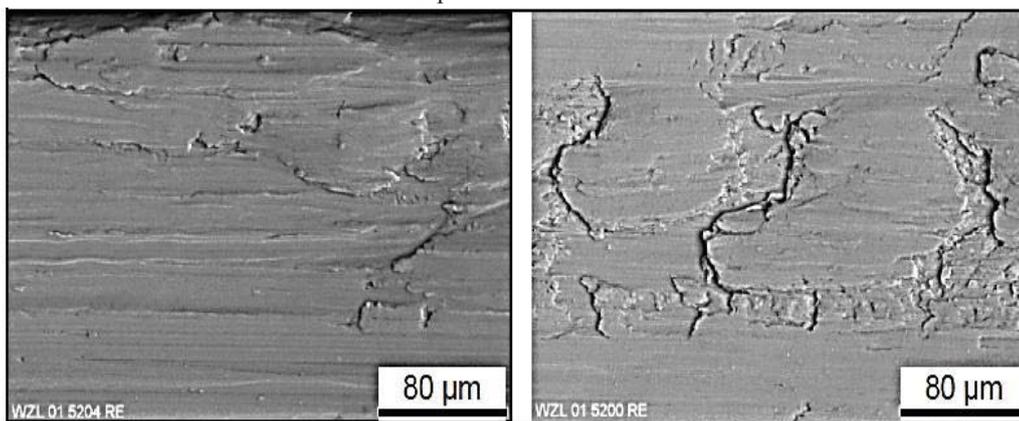
Além dos fatores já mencionados que apresentam influência sobre os valores da rugosidade há outro fenômeno que pode interferir sobre o acabamento superficial da peça

usinada: é o chamado efeito de caldeamento de material sobre a superfície usinada (BORDIN, 2013).

Este caldeamento pode ser definido com uma porção de material aderido na superfície da peça, oriundo do escorregamento do cavaco, o qual escoia pela região da quina/guia e também pela superfície de folga da ferramenta. Devido à alta temperatura e pressão no corte, o cavaco é plastificado na superfície usinada, o que pode gerar marcas regulares (alisadas) ou irregulares (porções) na superfície usinada, às vezes com aspecto escamado (ZEILMANN *et al.*, 2014).

Zeilmann *et al.*, (2014) avaliou a formação de caldeamento sobre a superfície de um aço P20 no processo de furação com diferentes sistemas de lubrificação, constatando que o material aderido na superfície do furo apresenta uma influência no aumento das tensões residuais e na variação de erros dimensionais. A Figura 3.26 representa uma imagem das regiões de material aderido na superfície do furo usinado pelo processo de furação.

Figura 3.26 – Amostra de material aderido na superfície do furo

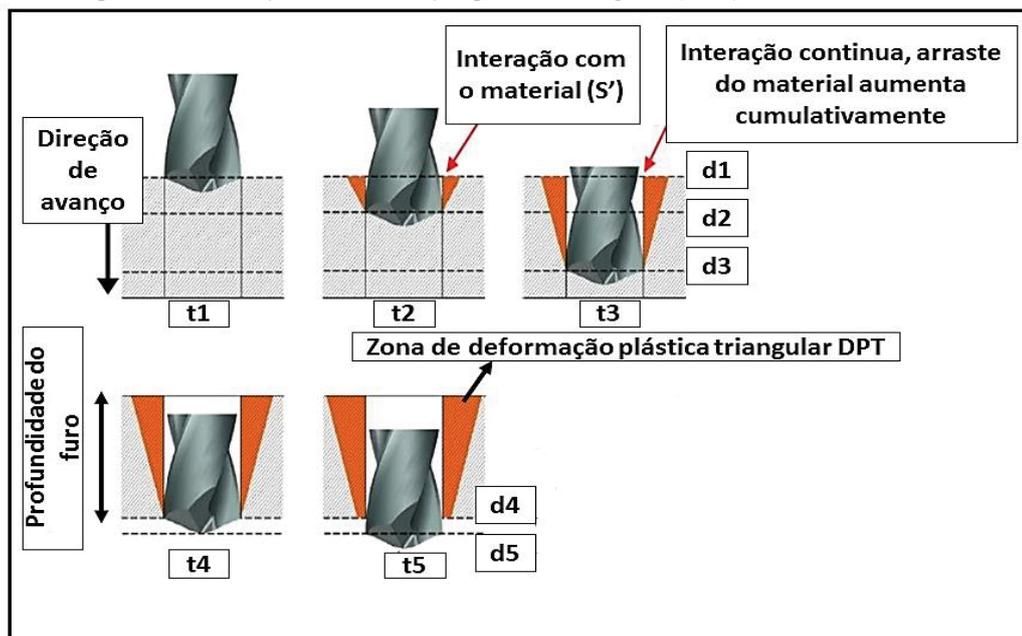


Fonte: Adaptado de ZEILMANN (2003).

Já segundo Kwong *et al.* (2009) o material aderido na superfície do furo é decorrência da interação entre a quina, a guia da broca e a superfície usinada e pode ser explicada em 5 (cinco) estágios.

No tempo  $t_1$  e na altura  $d_1$ , a ferramenta toca a superfície da peça. A quina da broca inicia uma interação entre a quina e a superfície da peça. Já no tempo  $t_2$  e na altura  $d_2$ , a broca penetra no material iniciando o corte ( $S'$ ), a profundidade e tempo de corte aumentam proporcionalmente, conforme mostra o esquema da Figura 3.27.

Figura 3.27 – Esquema de avaliação da deformação plástica triangular (DPT)



Fonte: Adaptado de Kwong *et al.* (2009).

No tempo  $t_3$  e na altura  $d_3$ , a quina da broca arrasta material no sentido do corte, causando uma deformação da superfície no sentido radial. As dimensões da deformação dependem do tempo de contato da ferramenta com a parede do furo e do atrito que acontece neste mecanismo de arraste. O material próximo da entrada do furo é submetido a períodos maiores de contato das guias com a superfície usinada se comparado a saída do furo, provocando uma região de maior acúmulo de material arrastado. Esta deformação radial é chamada de deformação plástica triangular (DPT), e pode representar uma variação de textura decorrente do material arrastado na interação das guias da ferramenta com a parede do furo. No tempo  $t_4$  e na altura  $d_4$ , a guia/quina da broca saem da superfície da peça, prolongando ainda a deformação plástica triangular por toda a extensão do furo. No tempo  $t_5$ , o único contato que existente é da guia da broca com a superfície do furo, pois já não há contato dos gumes com o material da peça KWONG *et al.* (2009).

Em alguns estudos sobre a relação entre rugosidade e a preparação dos gumes (com e sem arredondamento) a rugosidade mostrou-se mais acentuada nas ferramentas com gume arredondados. Tal incremento foi explicado pelo efeito “*ploughing*”, onde a deformação plástica à frente do gume torna a rugosidade elevada em comparação com ferramentas sem alteração da mesogeometria (BURHANUDDIN *et al.*, 2011; ÖZEL *et al.*, 2008; BIERMANN e DENKENA, 2014).

Biermann e Terwey (2008) observaram resultados contrários na furação de um aço ABNT 1045 com brocas helicoidais de metal duro com diferentes condições de mesogeometria (sem preparação, com preparação intermediária e preparação severa). Os autores concluíram que, os valores de rugosidade nas furações utilizando as brocas com preparação intermediária foram reduzidos em relação às brocas sem preparação e com preparação severa da mesogeometria. Este fato foi explicado devido ao fenômeno “*ploughing*” (sulcamento) na condição com os gumes severamente arredondados. Segundo o estudo, quando a preparação da mesogeometria é mais acentuada, há a possibilidade de grandes deformações plásticas à frente do gume. Contudo, na utilização de gumes com raios intermediários, ocorreu uma redução dos valores de rugosidade, o qual foi explicado devido à uma maior resistência mecânica do gume sem promover o efeito de sulcamento, tornando a furação mais estável e, com isso, um incremento na vida útil da ferramenta. Outro fato citado foi em relação à redução do desgaste (VB) nas ferramentas com preparação de arredondamento do gume.

Santana e Polli (2015), na furação de aço SAE 4144M temperado e revenido, compararam os valores de rugosidade utilizando ferramentas com gumes afiados, arredondados e chanfrados; os autores concluíram que a ferramenta com gume afiado agerou os maiores valores de rugosidade enquanto as ferramentas com gume arredondado e chanfrado obtiveram os menores valores de rugosidade, porém, sem diferença estatística entre si, fato explicado pela maior estabilidade do corte com gumes preparados (arredondado e chanfrado).

Na furação de um aço P20 com dureza de 34 HRC utilizando ferramenta de metal-duro e diferentes condições de aplicação de Fluido lubrificante, foram analisados os efeitos sobre o processo causados pela redução dos fluídos, sua relação com o desgaste da ferramenta e a integridade da peça por ZEILMANN *et al.* (2014). Os autores concluíram que o sistema com mínima quantidade de Fluido apresenta uma textura mais homogênea (lisa) ao longo do furo com pequenas porções de material aderido na superfície do furo. O fato foi explicado pela microlubrificação aplicada próximo à região de corte, associado com o cisalhamento facilitado pelo aumento da temperatura, o que reduziu as forças de corte, contribuindo com a redução dos valores de rugosidade

Biermann *et al.* (2012a) concluíram em sua pesquisa que a preparação do gume aumenta a vida útil da ferramenta, tendo como causa a maior estabilidade do processo devido ao arredondamento do gume. Em relação à rugosidade, verificaram que o arredondamento melhorou a qualidade do furo.

Davim (2010) cita que, se o processo de corte proporcionar atrito elevado entre o cavaco e a superfície de saída, porções do cavaco podem soldar-se sobre à superfície de saída formando uma espécie de “camada sobreposta” na região usinada. Quando esta região assume valores elevados, o material aderido pode ser deslocado para a superfície da peça, prejudicando o acabamento superficial e, em alguns casos, podendo ficar plastificados em cima de trincas ou microtrincas oriundas da camada afetada pelo calor, o que pode ser maléfico para a vida em fadiga dos componentes.

A rugosidade da superfície pode sofrer variações em seus valores médios. O arredondamento dos gumes pode provocar um efeito de deformação plástica lateral. O aumento da rugosidade dependerá de outros fatores como material da peça e parâmetros de corte. Em contrapartida, a preparação do raio de arredondamento pode aumentar a estabilidade do processo, o que eleva a qualidade da superfície usinada. Por isso, a preparação da ferramenta tem de ser cuidadosamente selecionada e avaliada, pois são muitos os fatores que podem alterar as condições da integridade superficial das peças; composição química do material, parâmetros de corte e meios lubrificantes são alguns exemplos (BIERMANN e DENKENA, 2014).

### **3.3.1.2 Rebarba**

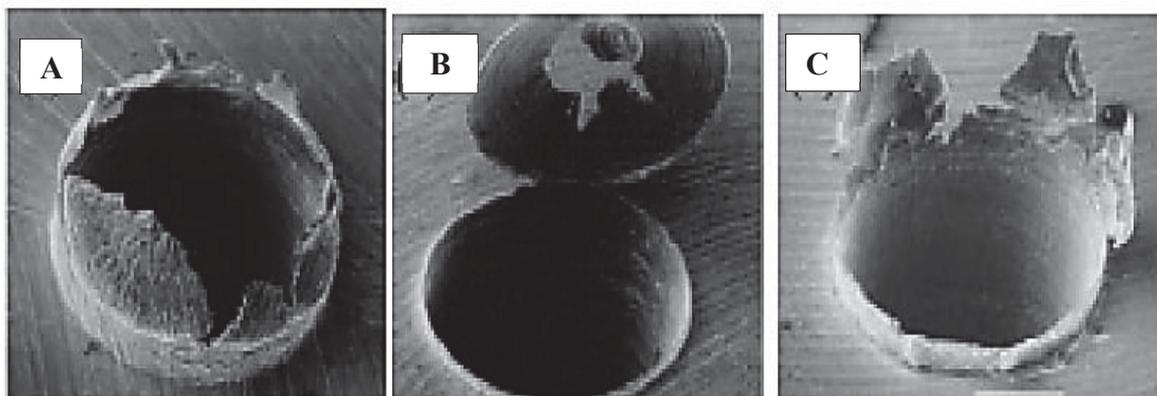
O processo de furação é um dos métodos mais utilizados e um dos mais importantes do setor metal mecânico (MACHADO *et al.*, 2009a). Com isso a rebarba gerada pelo processo é um problema comum e usual. A rebarba pode ser definida como sendo o “restante de material encontrado fora da forma geométrica nominal de uma borda externa, deixada como resíduo da usinagem ou outro processo de fabricação”. Porém, alguns autores utilizam uma definição mais geral. As rebarbas podem ser definidas como partes de material salientes e aderidas a superfície da peça, muitas vezes indesejáveis e que tem sua formação oriunda de uma deformação plástica à frente do gume. A formação da rebarba pode apresentar consequências danosas a peça e a segurança dos trabalhadores. Neste sentido, pode-se citar: variação geométrica e dimensional, problemas de interferência funcional (montagem), redução da vida em fadiga, podem resultar em um concentrador de tensão e gerar riscos à integridade física dos operadores (DORNFELD *et al.*, 2014; BU *et al.*, 2015).

O processo de rebarbação (termo utilização para a operação de retirada da rebarba), depende tempo, mão de obra, ferramentas, insumos e máquinas, os quais podem aumentar o

custo por peça em até 30%. Os custos com rebarbação foram estimados em até 500 milhões de euros por ano na Alemanha (DORNFELD *et al.*, 2009; PINTO, 2010).

O processo de furação forma rebarbas na entrada da broca por deformação plástica e na saída por conformação do material devido às altas taxas de compressão do centro do furo. Outros fatores que influenciam a formação da rebarba são: o avanço da ferramenta, a geometria da broca (ângulo de ponta, ângulo de hélice), a propriedade do material (dureza, rigidez e ductilidade), as condições do processo (velocidade de corte, avanço e uso de lubrificação/refrigeração) e o desgaste da ferramenta. Existem algumas classificações para os tipos de rebarbas geradas no processo de furação. As mais usuais estão representadas na Figura 3.28: tipo I coroa (A), tipo II chapéu (B) e tipo III transitória (C) (MACHADO *et al.*, 2009b; DORNFELD *et al.*, 2009).

Figura 3.28 - Tipos de rebarbas gerada no processo de furação

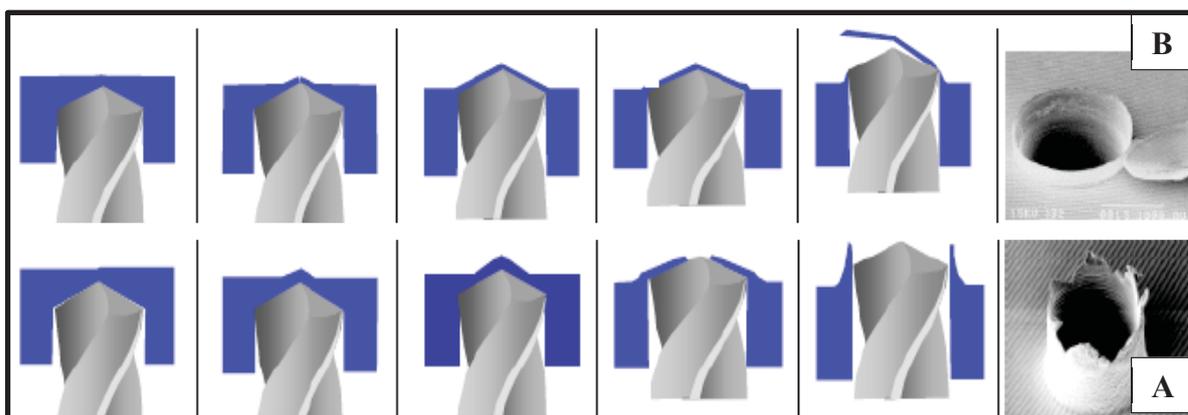


Fonte: Adaptado de Machado et al. (2009b).

Apesar de as rebarbas apresentarem morfologia semelhante, o mecanismo do processo de formação pode ser totalmente diferente. A formação da rebarba do tipo chapéu tem uma tendência de ser gerada em velocidade de corte e avanços reduzidos (BU *et al.*, 2015). A Figura 3.29 representa o mecanismo de formação das rebarbas tipo chapéu “B” e tipo “A” coroa.

Na furação, a rebarba pode ser formada resumidamente em duas situações. A broca, ao se aproximar da saída do furo, encontra pouca resistência no centro da broca devido à espessura do material abaixo do gume transversal; esta, por apresentar ângulo de saída negativo no centro, promove uma deformação plástica acentuada nesta região; já próximo à quina da ferramenta há material suficiente para promover certa rigidez, que reduz a deformação plástica local. Quando a tensão de compressão no centro do furo não é mais suportada pelo material da peça, iniciam-se trincas e a ponta da ferramenta começa a sair da peça.

Figura 3.29 – Esquema de formação da rebarba tipo chapéu (B) e tipo coroa (A)



Fonte: Adaptado de Dornfeld (2004).

Os gumes principais continuam sua função e uma pequena ruptura forma-se no centro do furo; o movimento de avanço da broca contribui para a formação da rebarba tipo coroa (A). Outra possibilidade de formação da rebarba apresenta uma deformação plástica acentuada na região próxima à quina da broca rompendo-se e formando uma rebarba tipo uniforme [chapéu (B)] que dependerá da ductilidade do material e geometria da ferramenta (PINTO, 2010; DORNFELD *et al.*, 2014).

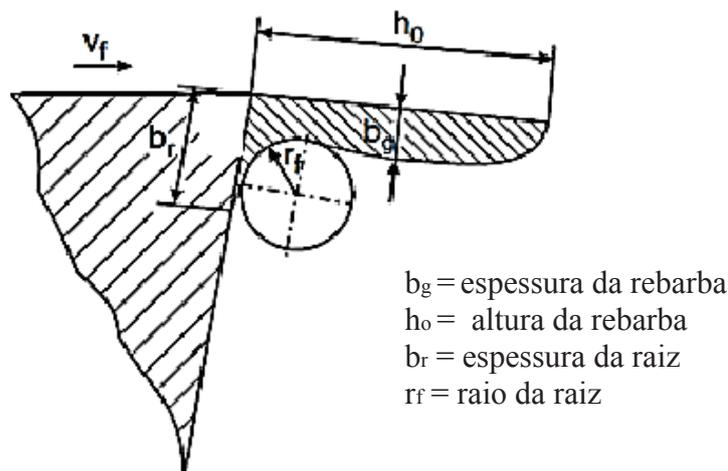
Além da identificação do tipo de rebarba é necessária uma mensuração de seus valores para avaliar e tentar minimizar a sua formação. Existem alguns métodos de medição e detecção de rebarbas disponíveis, mas a escolha do sistema mais adequado depende da precisão necessária de medição. Em alguns casos, a medição da altura e espessura da raiz da rebarba são suficientes para avaliar e apresentar conclusões parciais sobre o processo (DORNFELD *et al.*, 2009). A Figura 3.30 mostra esta condição.

Segundo Silva (2011) o aquecimento elevado na região de corte pode proporcionar alterações nas propriedades mecânicas da peça devido ao incremento de temperatura que favorece a deformação plástica do material. Com isto, a utilização de meios lubrificantes pode apresentar influências em relação à formação e ao dimensional da rebarba gerada.

Em um trabalho feito por Mondal *et al.*, (2014) na furação de um aço baixa liga com dureza média de 225 HB com broca de aço rápido de 14 milímetros de diâmetro com aplicação de Fluido em abundância e a seco, os autores concluíram que a altura da rebarba apresenta influência significativa com a condição de aplicação do Fluido lubrificante. Os autores concluíram que as rebarbas apresentaram altura e espessura de raiz maiores nas furações a seco. O fato foi explicado pela maior temperatura apresentada nesta condição e com isto a

deformação plástica produzida é mais acentuada, provocando os maiores valores de rebarba. A aplicação do Fluido em abundância reduz a temperatura da peça/ferramenta, o que faz com que a deformação seja menor e por consequência a geração da rebarba será reduzida.

Figura 3.30 – Esquema de medição de altura e espessura da rebarba gerada



Fonte: Adaptado de DORNFELD *et al.* (2009).

Machado *et al.* (2009b), em um trabalho sobre furação em um aço microligado DIN 38MnS6 com dureza média de 225 HV utilizando brocas de aço rápido de 10 milímetros de diâmetro revestidas com TiAlN, observaram que as variáveis que reduzem as forças de corte contribuem para a redução dos valores das rebarbas geradas. Neste estudo, as furações com fluídos em abundância apresentaram os menores valores de altura da rebarba em comparação com o sistema de mínima quantidade de lubrificante (MQL) e na furação totalmente sem Fluido; este fenômeno foi atribuído à influência dos fluídos lubrificantes sobre este fenômeno: como o Fluido retira calor do sistema ferramenta/peça, a ductilidade do material é reduzida e, consequentemente, a capacidade de deformação e formação da rebarba também diminui.

Biermann e Hartmann (2012) realizaram um estudo sobre a altura da rebarba gerada no processo de furação utilizando um aço 34CrNiMo6 e uma liga de alumínio AlMgSi1 com diferentes condições de aplicações de fluídos (abundância, CO<sub>2</sub>, seco). Os autores concluíram que a altura da rebarba apresenta um incremento nos seus valores médios na condição a seco em comparação com os outros meios de aplicação. Este fenômeno foi explicado como sendo uma consequência da elevada temperatura gerada pela interface ferramenta/cavaco. Com isso, a ductilidade do material é facilitada, proporcionando um aumento dos valores da rebarba.

Neste sentido, torna-se relevante avaliar maneiras de minimizar a formação das rebarbas, mesmo sendo praticamente impossível eliminá-las do processo de furação. A redução de sua topografia pode contribuir para a redução de retrabalhos (rebarbação) posteriores, que geram custos adicionais.

### **3.3.2 Aspectos Sub Superficiais**

Durante o processo de furação a região de corte é submetida a altas pressões e temperaturas. Nestas condições, podem surgir alterações nas camadas abaixo da superfície usinada. Estas variações podem apresentar-se na forma de região afetada termicamente, por deformações plásticas e por alterações do perfil de dureza. Estas modificações, ocorrem devido às solicitações térmicas e mecânicas a que o processo está submetido (BOSHEH e MATIVENGA, 2006; FARIAS, 2009). As análises serão relatadas apenas para algumas características sub superficiais em função da grande aplicabilidade e importância das interpretações dos resultados.

#### **3.3.2.1 Camada Afetada pelo Calor (CAC)**

A camada afetada pelo calor (CAC) ou “camada branca” é um termo genérico para se referir a camadas sub superficiais modificadas e com dureza mais elevada que o material não deformado. A CAC pode ser atribuída a dois fenômenos: fluxo plástico de material cisalhado e rápido aquecimento e resfriamento da superfície usinada. Esta camada pode variar dependendo das propriedades térmicas, mecânica e químicas presentes. Em decorrência da severidade do cisalhamento no corte do material, poderá surgir martensita não revenida, tornando esta região de comportamento frágil (FERREIRA, 2011).

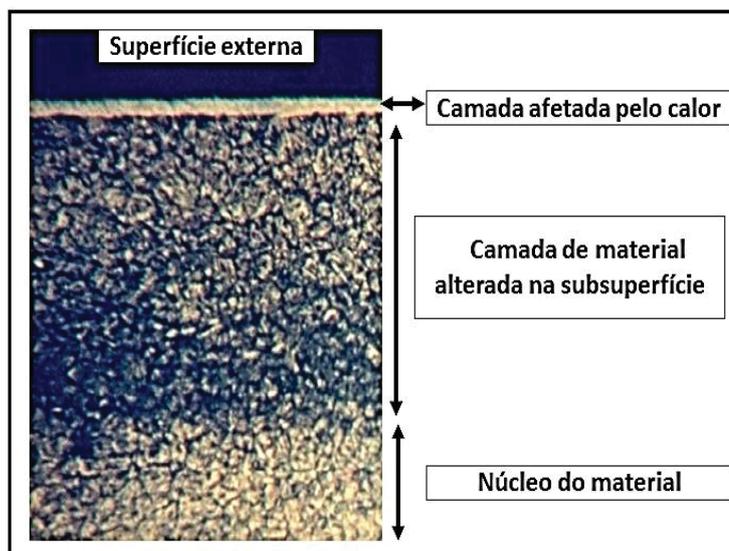
A temperatura resultante dos processos de usinagem com parâmetros de corte excessivos ou com usinagem a seco pode ser tão intensa que uma camada alterada abaixo da superfície usinada poderá surgir. Nesta região, as propriedades mecânicas podem ser diferentes em relação ao núcleo central do material. Um exemplo desta modificação é o aumento da propriedade de dureza, que pode ser explicado pela variação das temperaturas envolvidas (SHARMAN *et al.*, 2008; MITCHELL *et al.*, 2008; LU, 2008).

A usinagem sem Fluido lubrificante pode contribuir para o crescimento desta camada branca na superfície da peça, a qual trará efeitos negativos sobre a resistência à fadiga,

tornando esta região uma fase frágil da microestrutura (BOSHEH e MATIVENGA, 2006; MITCHELL *et al.*, 2008).

A Figura 3.31 retrata 3 regiões distintas. Próximo à superfície externa da peça apresenta-se a camada afetada pelo calor, sendo que nesta superfície a região sofre a ação mecânica do corte. Na região abaixo da camada afetada pode ocorrer variações de microestrutura em decorrência da severidade do corte. Logo abaixo da CAC localiza-se o material-base praticamente sem alterações (FARIAS, 2009).

Figura 3.31 – Camada afetada pelo calor (CAC)



Fonte: Adaptado de FARIAS (2009).

Seguindo as tendências mundiais de eliminação ou redução da aplicação dos fluídos lubrificantes na usinagem, a CAC é um ponto importante de investigação quanto a possibilidade da eliminação destes fluídos, pois podem ter efeitos relevantes na aplicação final da peça. Algumas alternativas estão sendo estudadas para reduzir tais efeitos sobre a camada afetada pelo calor na superfície usinada; a preparação da mesogeometria e a usinagem com sistema MQL são possibilidades. Pode existir uma relação entre a mesogeometria da ferramenta com a camada afetada pelo calor produzida pelo processo de furação.

Cheung *et al.*, (2008), Biermann e Denkena *et al.*, (2014) mostram que o calor gerado no processo é melhor distribuído (dissipado) nas ferramentas com gumes arredondados em função da maior área de contato. Estes apresentam alta estabilidade devido à redução na magnitude das solicitações mecânicas que são concentradas na ponta da ferramenta (no gume,

na guia e na quina) arredondada, sendo o gradiente das tensões mais suave se comparado com arestas afiadas, o que contribuir para a redução das forças de avanço e das deformações.

Zeilmann *et al.* (2013) mostram no fresamento de um aço P20 que a camada afetada pelo calor é reduzida conforme a magnitude do raio de arredondamento do gume. Este comportamento foi atribuído à melhor distribuição das solicitações sobre o gume arredondado levando a uma menor geração de atrito (calor) e por consequência da CAC.

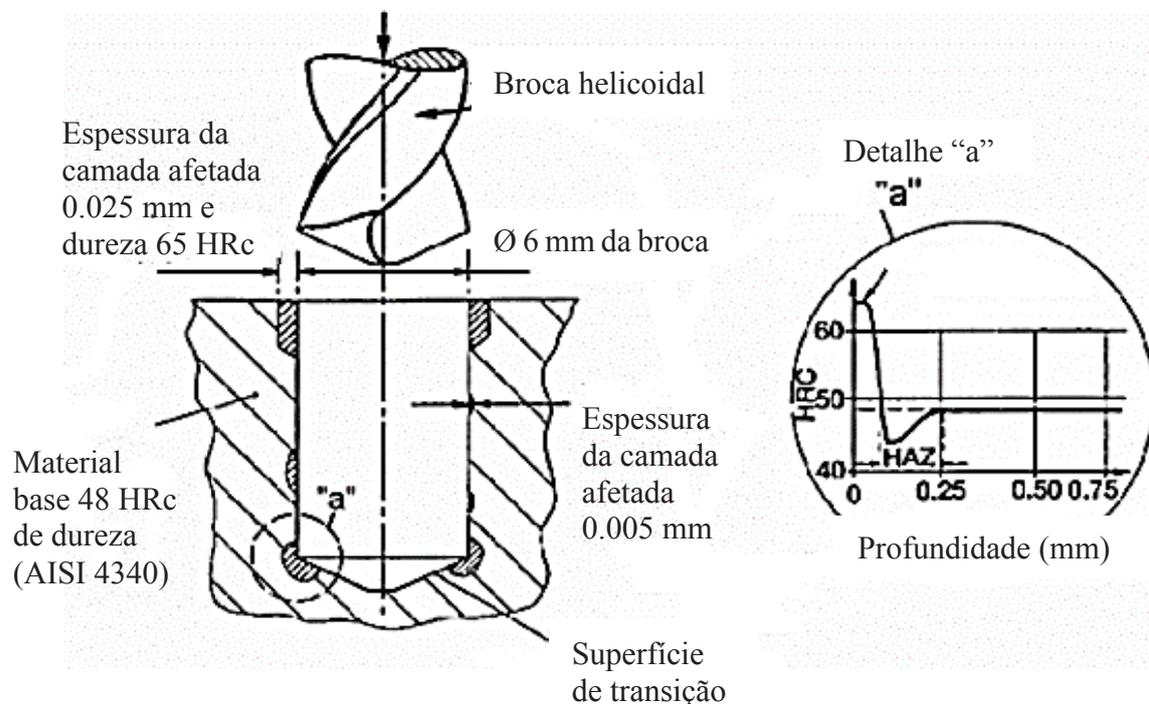
Na furação, a camada branca é um problema bem específico, pois podem produzir altas pressões e temperaturas dentro da peça causados pelo atrito da ferramenta contra a peça. Este fenômeno é mais pronunciado em algumas regiões do material-base, como na entrada do furo e próximo à quina da broca. Altas temperaturas na zona de contato podem atingir seu pico em 0,1 ms, alterando a microestrutura final (DAVIM 2010). Este fenômeno é representado na Figura 3.32 na furação de um aço AISI 4340 com 48 HRC de dureza. Observa-se na entrada da ferramenta uma porção de material alterado com cerca de 0,025 mm de espessura com uma dureza de 65 HRC. Isto mostra que dependendo da severidade do processo esta região pode ser um problema para a integridade do material, pois este incremento na dureza pode fragilizar a peça, reduzindo sua resistência mecânica. O detalhe “a” mostra a relação entre a profundidade da zona afetada pelo calor (CAC) e a dureza atingida neste estudo (DAVIM 2010).

Zeilmann e Bordin (2014), em um estudo sobre furação de aço P20 com 36 HRC de dureza e usinada com velocidade de corte 40 m/min e avanço 0,10 m/ver. com broca de metal-duro K30F com cobertura de TiAlN com 8,5 mm de diâmetro, com e sem arredondamento da mesogeometria, não encontraram diferenças significativas na magnitude da CAC com ambas as ferramentas. Os autores explicam que o arredondamento dos gumes aumenta a temperatura na região do corte, se beneficiando desta temperatura para reduzir as forças de cisalhamento do material, como nesta situação a área de contato do gume é maior se comparada à ferramenta sem preparação, os esforços de corte são maiores. Este incremento de temperatura pode auxiliar no escoamento do cavaco.

Herbert *et al.*, (2014), em um trabalho sobre furação de uma superliga de níquel, concluíram que pode ter alterações de magnitude da camada afetada pelo calor (CAC) em diferentes regiões da peça. Os autores concluíram que na entrada do furo os valores da CAC tiveram magnitudes superiores em relação à região de saída do furo. Tal fato foi explicado pela deformação plástica triangular (DPT), que tem sua ação favorecida pelo maior tempo de contato das regiões de corte da broca com o material da peça no início do processo (devido ao atrito, a temperatura torna-se maior e a extensão no sentido radial da peça é superior favorecendo a

CAC), o que não ocorre na saída da broca, onde o tempo de contato é reduzido em pequenas espessuras do material usinado.

Figura 3.32 – Representação da Camada afetada pelo calor na furação de um aço AISI 4340



Fonte: Adaptado de Davim (2010).

Conforme citado por Biermann *et al.*, (2012b) e Nicola *et al.*, (2012), o sistema MQL pode se beneficiar da temperatura no corte devido ao cisalhamento ser facilitado pela menor resistência do material em altas temperaturas, reduzindo as forças de corte. O fato de a lubrificação ser mais efetiva nesta condição devido à aplicação do “*spray*” ser próximo às partes cortantes, o sistema MQL pode apresentar resultados similares à aplicação do Fluido em abundância em algumas condições.

Ulutan e Özel (2011), em um estudo sobre as variações da integridade superficial em ligas de titânio e ligas de níquel, os autores citam que o mecanismo de aquecimento rápido e resfriamento posterior pode criar uma camada branca martensítica próximo às regiões usinadas. No entanto, esta formação pode surgir na ausência de altas temperaturas, sendo os efeitos mecânicos severos suficientes para permitir as transformações de fase.

Neste sentido, para o entendimento dos fenômenos que ocorrem em diferentes ligas faz-se necessário um acompanhamento mais rigoroso em relação às possíveis variações que possam influenciar nas subcamadas do material usinado.

### 3.3.2.2 Perfil de Dureza

Na usinagem, a propriedade de dureza pode ser definida como uma medida de resistência ao corte ou um valor de resistência de um material à deformação plástica localizada. Após os processos de usinagem, a dureza da superfície pode ser alterada devido à ação severa do corte. A camada subsuperficial da peça pode sofrer variações de dureza em decorrência do encruamento do material (CALLISTER e WILLIAN, 2012).

O material possui uma dureza homogênea em escala macroscópica; porém, em escala microscópica, a dureza varia de acordo com a fase analisada (BORDIN, 2013).

Na avaliação do perfil de dureza em peças que apresentam camadas cementadas, regiões obtidas por tratamentos superficiais, alterações provocadas pelo processo de usinagem e camadas encruadas, utilizam-se indentadores de dimensões micrométricas e escalas de dureza microvickers, onde as cargas utilizadas são inferiores a 1 Kgf (LIMA, 2008).

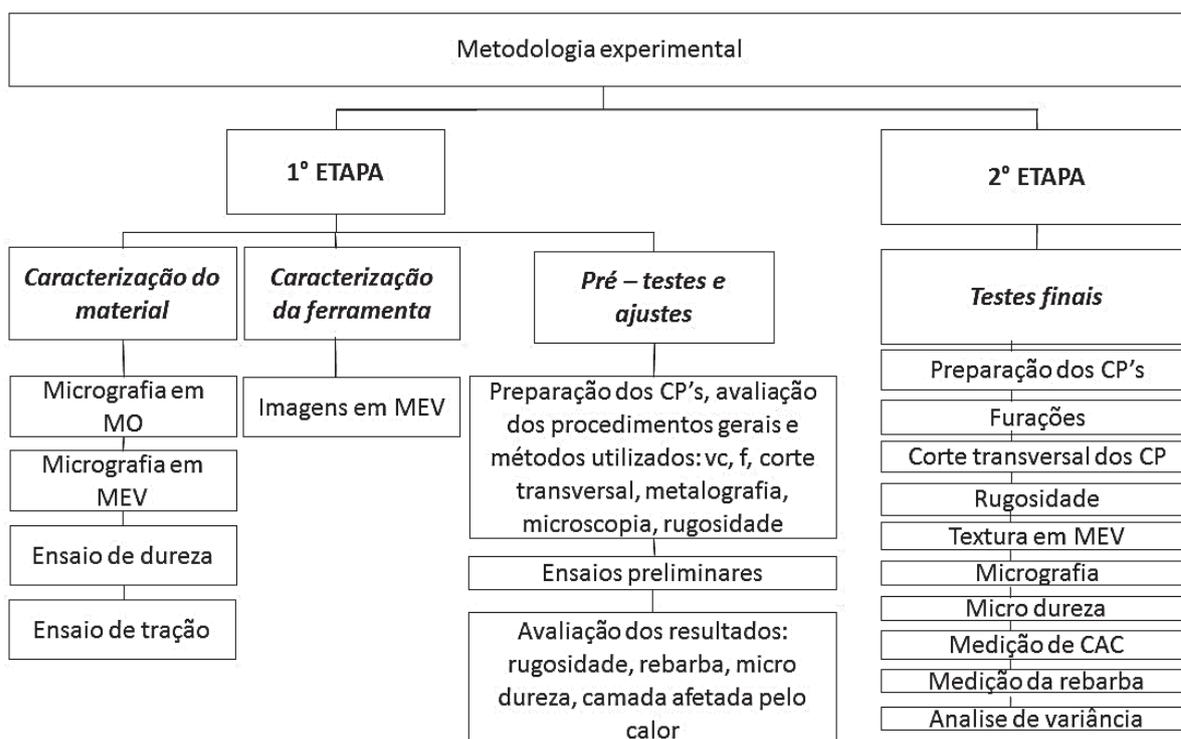
Ulutan e Özel, (2011) citam que na superfície do material a dureza é mais acentuada que em uma região deslocada da superfície, pois na região próxima à borda do furo o material pode apresentar encruamento devido à ação da ferramenta de corte.

Mondelin *et al.* (2011), em um estudo sobre a influência do processo de torneamento sobre a integridade superficial em um aço inoxidável 15-5PH, avaliaram a camada branca próxima à superfície usinada. Os autores verificaram que dureza nesta região é superior à dureza do material-base da peça. Este fato foi atribuído ao refinamento de grão induzidos por deformações plásticas severas e resfriamentos durante o processo de corte.

## 4 MATERIAIS E MÉTODOS

A Figura 4.1 mostra o organograma das ações experimentais. Os ensaios foram divididos em duas etapas, como segue:

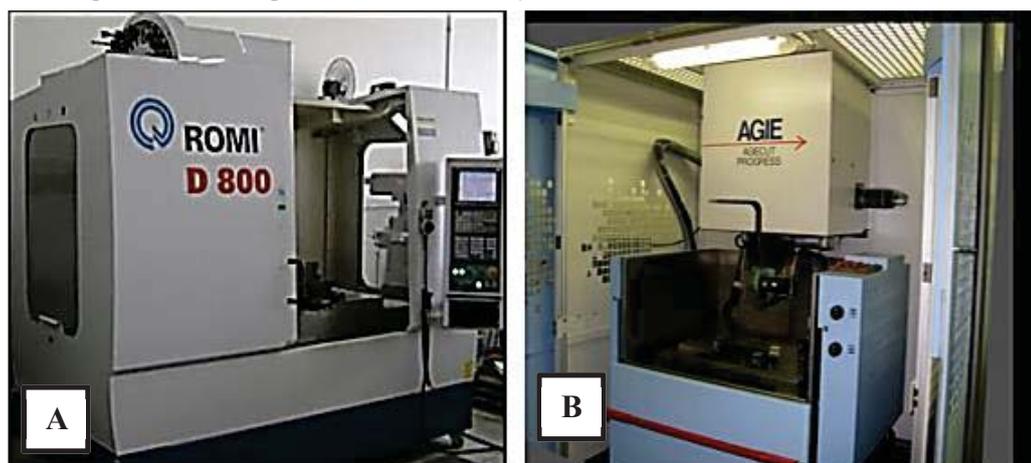
Figura 4.1 – Metodologia experimental dos ensaios



Fonte: O autor

Os ensaios de furação foram realizados em um centro de usinagem vertical ROMI Modelo D800 equipado com comando numérico computadorizado Fanuc 0i-MC, mesa de trabalho com dimensões 914 x 500 mm, curso de operação de 800 x 530 x 580 mm (X, Y, Z) respectivamente, equipada com eixo-árvore de 7500 rpm e potência do motor principal de 15kW. Possui trocador automático de ferramentas e um magazine com capacidade para 40 ferramentas. O equipamento está alocado no Núcleo de Tecnologia Mecânica da Universidade de Passo Fundo, conforme Figura 4.2 em “A”. Para o seccionamento dos corpos de prova no sentido transversal a parede do furo, foi utilizada uma máquina de eletro erosão a fio da marca AGIECHARMILLES modelo Ac200, com diâmetro do fio 0,25mm. A Figura 4.2 em “B” mostra o equipamento.

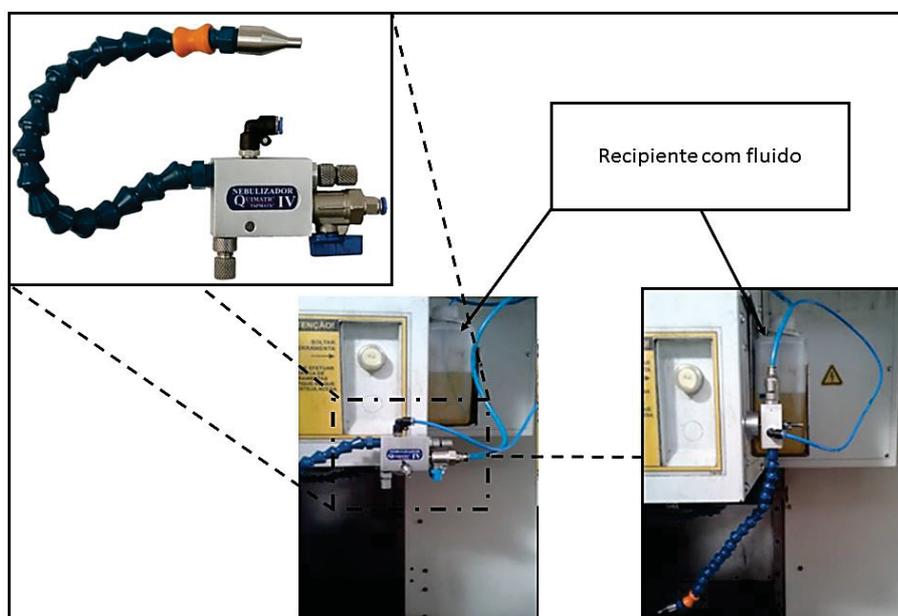
Figura 4.2 – Maquinas utilizadas para os ensaios de furação e corte dos CP's



Fonte: O autor

A máquina ferramenta ROMI D800 não foi projetada para utilização do sistema MQL interno. Por isso, foi adaptado um sistema móvel de lubrificação por bico externo da empresa Quimatic modelo IV. O recipiente contendo o Fluido foi adaptado junto com a própria máquina ferramenta, conforme mostra a Figura 4.3.

Figura 4.3 – Sistema de aplicação mínima quantidade de lubrificante (MQL)



Fonte: O autor

A pressão de trabalho utilizada foi de 5 bar, com vazão de 50 ml/h. O sistema utiliza uma tubulação de saída para mistura óleo/ar sem conexões em curva para minimizar a perda de

carga. A quantificação exata da saída de óleo é imprecisa pelo fato de o ajuste do fluxo ser feito via fuso mecânico, o qual controla a distribuição do “*spray*” aerossol. Para determinação da vazão total do sistema, foi utilizado um becker graduado e um cronômetro digital para verificação do tempo necessário para preencher o recipiente de 100 ml. Foram registradas cinco leituras de volume/tempo para determinar um fluxo médio de 50 ml/h.

Para avaliação das ferramentas, as superfícies (textura) da parede dos furos e medição da altura e espessura das rebarbas foi utilizado um microscópio eletrônico de varredura (MEV) marca TESCAN modelo VEGA LM 3 com ampliações máximas na ordem de 300000x, com análise de espectrometria de energia dispersiva de raios-X (EDS) da marca OXFORD Instruments, conforme a Figura 4.4 em “A”.

Os valores de rugosidade foram medidos utilizando um rugosímetro portátil da marca Mitutoyo modelo SJ 410 com impressora acoplada para impressão do perfil de rugosidade gerado. O equipamento tem resolução de 0,01  $\mu\text{m}$ , com raio de ponta do apalpador de 5 $\mu\text{m}$  em diamante e velocidade de deslocamento do apalpador de aproximadamente 2,5 mm/s. O equipamento está ilustrado na Figura 4.4 em “B”.

Figura 4.4 – Microscópio eletrônico de varredura (MEV) e rugosímetro portátil



Fonte: O autor

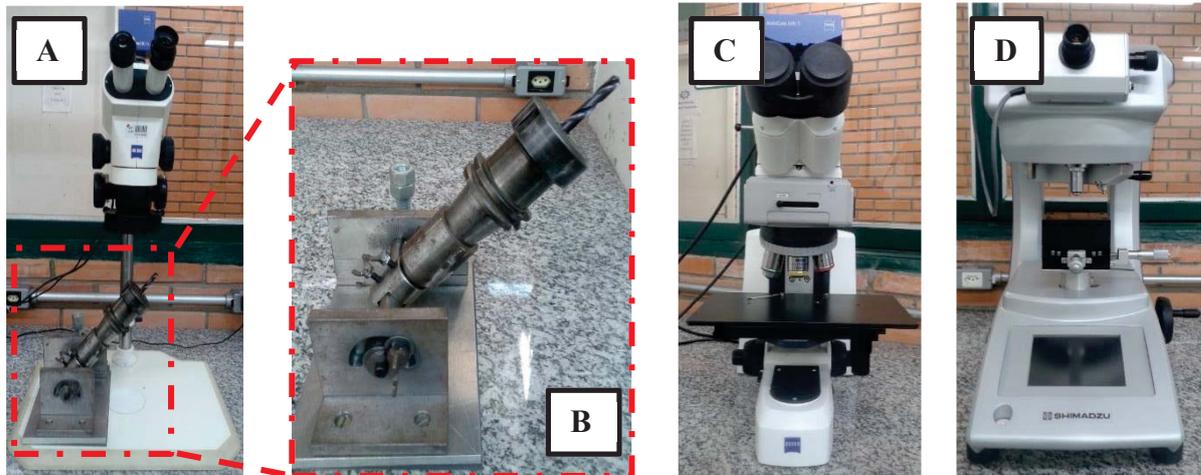
As imagens macro gráficas foram geradas por um estéreo microscópio binocular da marca ZEISS modelo STEMI 2000-C com aumento máximo de 50x, conforme Figura 4.5 em “A”. As imagens micro gráficas foram obtidas com auxílio de um microscópio óptico da marca ZEISS, modelo AXION SCOPE A1, com ampliações máximas de 1000x, contendo um

*software* acoplado ao mesmo sistema de aquisição de imagens que possibilita algumas medições. O microscópio está ilustrado Figura 4.5 em “C”.

Para avaliação de microdureza Vickers foram realizadas leituras com um microdurômetro da marca Shimadzu, modelo Série HMV-G20 o equipamento está ilustrado na Figura 4.5 em “D”.

A Figura 4.5 em “B” ilustra o dispositivo de fixação do cone BT 40, desenvolvido para realização das imagens no estéreo microscópio.

Figura 4.5 – Equipamentos de análise da microestrutura e dispositivo de medição da broca



Fonte: O autor

#### 4.1 Primeira Etapa

Esta etapa consiste de:

- Caracterização do material para furação utilizando microscopia óptica, micrografia em microscópio eletrônico de varredura (MEV), ensaio de dureza e ensaios de tração.
- Caracterização da ferramenta através de imagens e medições utilizando estéreo microscópio e MEV.
- Pré-testes e ajustes: extração os corpos de prova da chapa bruta (corte retangular com serra fita e operação de fresamento da largura e comprimento); avaliação dos parâmetros de corte definidos (análise visual durante o processo de furação (fagulhas e ruídos) e análise dos danos à ferramenta utilizando o estéreo microscópio); início dos ciclos de furações; corte transversal da parede dos furos utilizando eletroerosão a fio; análise dos valores de rugosidade; limpeza das peças em ultrassom para visualização e registro da textura

utilizando MEV; preparação metalográfica e análise micrográfica da subsuperfície da região próxima à borda do furo; análise da camada afetada pelo calor e medição da altura da rebarba no MEV; e medição dos valores de microdureza da região próxima à borda do furo.

#### 4.1.1 Caracterização do Material-base à Furar

O material utilizado neste trabalho foi uma chapa de aço DIN S700MC, com nome comercial de OPTIM 700MC Plus, da empresa SSAB/Ruukki, Finlândia.

Este é um aço de alta resistência e baixa liga, com laminação termomecânica e resfriamento controlado. A tabela 4.1 mostra a composição química do aço fornecida pela engenharia metalúrgica da empresa SSAB/Ruukki, cuja microestrutura pode ser observada nas Figuras 4.6.

Tabela 4.1 - Composição química do aço DIN S700MC (% em massa)

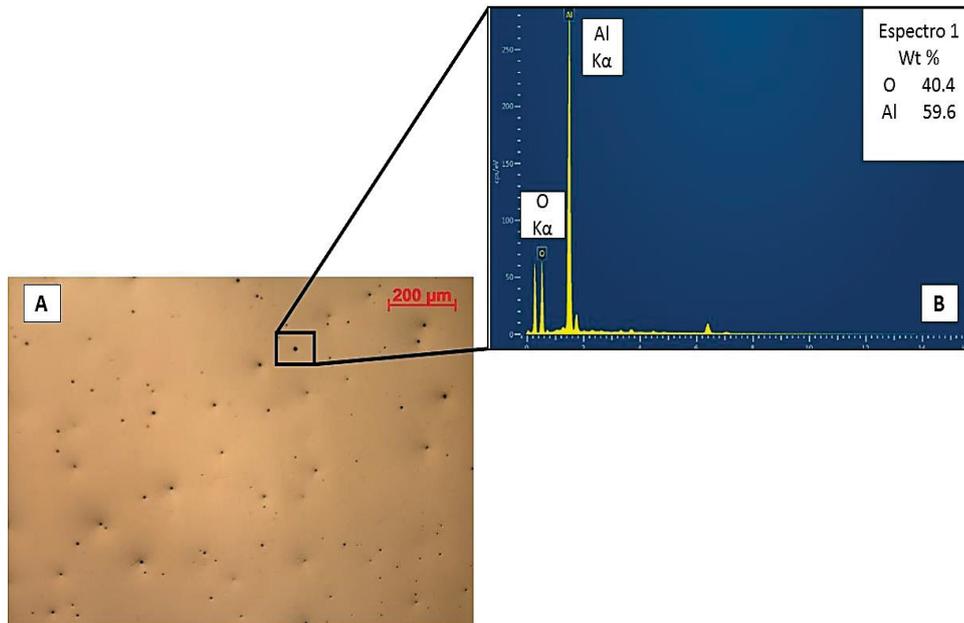
<b>OPTIM 700MC</b>	<b>C</b>	<b>Si</b>	<b>Mn</b>	<b>P</b>	<b>S</b>	<b>Al</b>	<b>Nb</b>	<b>V</b>	<b>Ti</b>	<b>N</b>	<b>Mo</b>
	0,056	0,180	1,790	0,009	0,004	0,047	0,640	0,011	0,102	0,004	0,009

Fonte: Adaptado do certificado de composição química da empresa SSAB/Ruukki.

Para análise microestrutural as amostras foram preparadas conforme recomendação da norma ASTM E3, conforme sequência de procedimento: corte metalográfico, lixamento manual (granulometria das lixas entre 120 a 1200), polimento com alumina 1µm, análise e registro das inclusões não metálicas sem ataque químico. Para revelação da microestrutura, a amostra passou por um ataque químico, o qual seguiu as orientações da norma ASTM E 407 com reagente Nital 3% (ácido nítrico 3% e álcool etílico 97%) por 20 segundos. As avaliações sobre a composição química das inclusões foram realizadas em MEV utilizando a técnica de espectrometria de energia dispersiva de raios-X (EDS). As análises seguiram recomendações da norma ASTM E45

A Figura 4.6 em “A” mostra a imagem do material-base sem ataque químico com ampliação de 100x utilizando um microscópio óptico (MO) modelo *ZEISS AXION A1*. As imagens foram realizadas no intuito de avaliar a distribuição e a morfologia das inclusões não metálicas. Em “B” tem-se a análise do espectro gerado pelo EDS, onde mostra a presença de óxidos de alumínio globulares com tamanho médio de 18 µm de diâmetro (média aritmética de 20 pontos em regiões distintas da amostra).

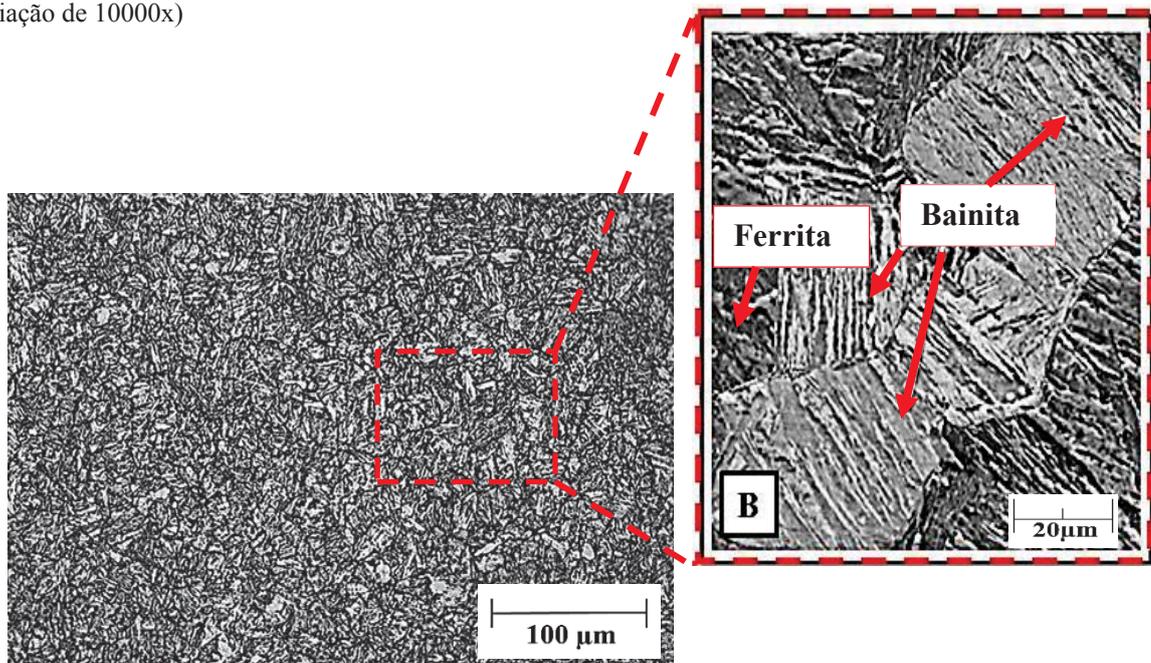
Figura 4.6 – Micrografia sem ataque em “A” (ampliação de 100x) e espectro por EDS em “B”.



Fonte: O autor

A figura 4.7 apresenta a micrografia gerada por (MO) com ampliação de 500x em “A” e por (MEV) com ampliação de 10000x em “B”. A microestrutura do aço é formada por ilhas dispersas de ferrita e bainita em aproximadamente 100% da estrutura. A imagem “A” e “B” mostram em detalhes os constituintes e os contornos de grão (ASM HANDBOOK Volume 9, 2004).

Figura 4.7 – Micrografia em microscópio óptico em “A” (ampliação de 500x) e em MEV em “B” (ampliação de 10000x)



Fonte: O autor

#### 4.1.1.1 Ensaio de Tração

Para uma análise complementar, foram realizados ensaios de tração no laboratório de Materiais e Processos da Engenharia Mecânica da Universidade de Passo Fundo, em uma máquina universal de ensaios mecânicos da marca Schenk com capacidade de 200 kN, com *software* Panatec 4.1 para geração da curva tensão/deformação. Os ensaios foram realizados em três corpos de prova para avaliar os valores da tensão máxima, da tensão de escoamento e o alongamento final. Os corpos de prova seguiram as recomendações descritas na norma ASTM E8M. A tabela 4.2 apresenta os valores médios gerados.

Tabela 4.2 - Ensaio de tração do aço DIN S700MC

<b>Amostras</b>	<b>Tensão máxima (MPa)</b>	<b>Tensão de escoamento (MPa)</b>	<b>Alongamento final (%)</b>
<i>Média aritmética</i>	<i>845,3</i>	<i>672,5</i>	<i>23,9</i>
<i>Desvio padrão</i>	<i>14,2</i>	<i>12,9</i>	<i>0,5</i>

\*Ensaio realizado pelo laboratório de Materiais e Processos da Universidade de Passo Fundo.

#### 4.1.1.2 Leitura de Dureza (HV)

Para determinar a dureza média do material-base, foram preparadas três amostras de diferentes regiões da chapa bruta. Em cada corpo de prova foram realizadas seis leituras sendo registrado a média aritmética de cada amostra. As análises seguem a norma de referência ASTM E 384. A tabela 4.3 mostra a dureza média com seu respectivo desvio padrão.

Tabela 4.3 - Valor médio de dureza em HV

<b>Amostras</b>	<b>Leitura média (HV)</b>	<b>Desvio padrão</b>
<i>Média geral</i>	<i>300</i>	<i>1,4</i>

\*Ensaio realizado pelo laboratório de Materiais e Processos da Universidade de Passo Fundo.

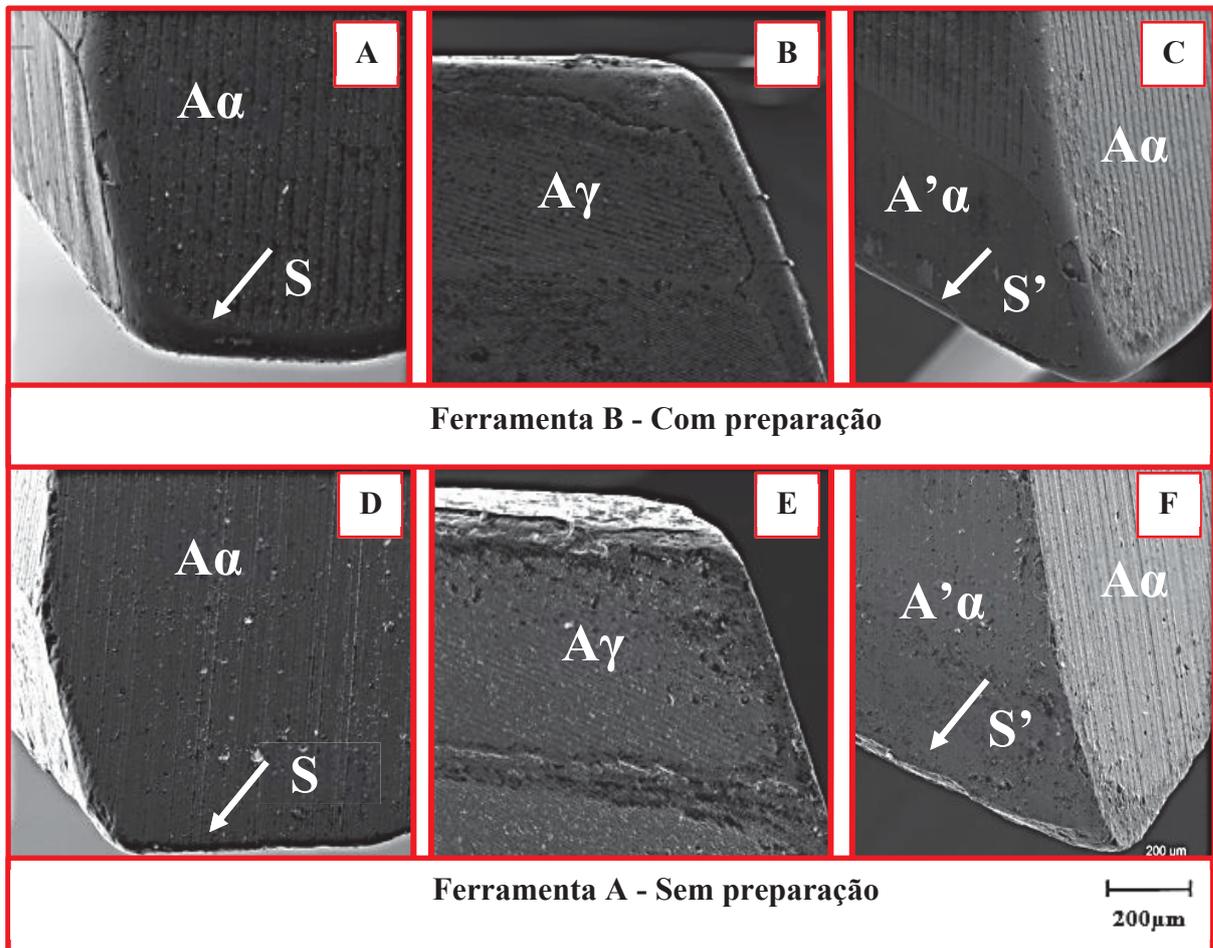
#### 4.1.2 Ferramentas de Corte Utilizadas

As brocas utilizadas neste trabalho são da marca Titex plus, identificada pelo código A3265TFL Alpha 2 (código do fabricante). Sua geometria corresponde à norma DIN 6537K, com diâmetro de 8,5 mm, substrato da classe K30F (microgrão), inteiriça de metal-duro, revestimento de TiAlN (microdureza de 3300 HV, coeficiente de atrito de 0,25), permite temperaturas de trabalho de até 900 °C, possui haste com diâmetro de 10 mm e comprimento

da haste de 40 mm, ângulo de folga  $\alpha = 10^\circ$ , ângulo de ponta  $\phi = 140^\circ$  e ângulo de saída  $\delta = 25^\circ$ , com afiação cruzada.

As brocas foram identificadas por sua condição de afiação; uma broca foi reafiada segundo a norma de referência e identificada como FERRAMENTA A, ilustrada na Figura 4.8 em “D - flanco”, “E - face” e “F - guia”; outra broca passou pelo mesmo procedimento de reafiação, porém foi acrescentado uma preparação de arredondamento da mesogeometria e identificada como FERRAMENTA B, ilustrada na Figura 4.8 em “A - flanco”, “B - face” e “C - guia”. As imagens foram feitas com microscopia eletrônica de varredura em 500x de aumento.

Figura 4.8 – Broca utilizadas nos ensaios de furação com suas respectivas terminologias (ampliação de 500x)

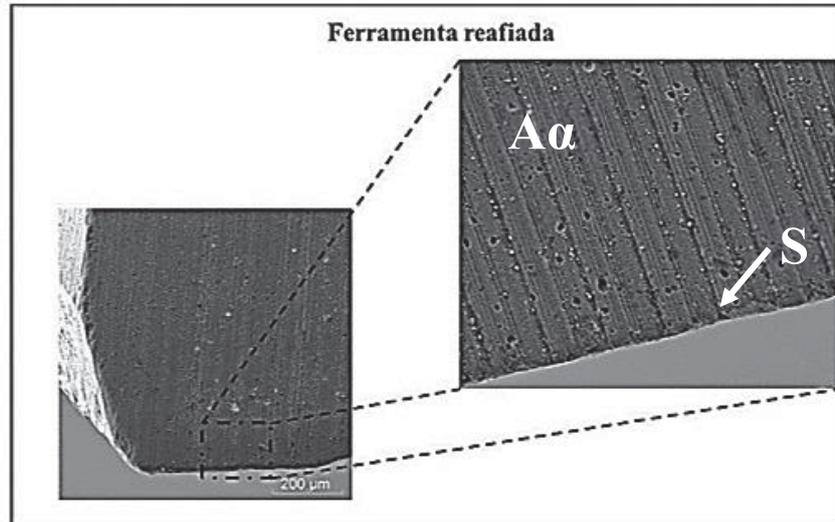


Fonte: O autor

Para uma melhor visualização das condições de acabamento das superfícies das brocas, foram registradas imagens de ambas as ferramentas na interface flanco/face com ampliações de 1000x na tentativa de localizar trincas ou possíveis concentradores de tensão, os quais podem

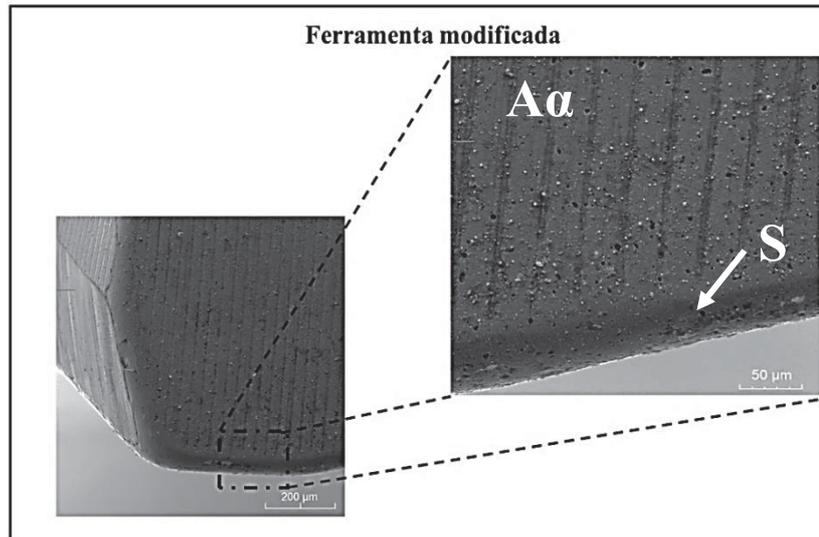
provocar uma instabilidade sobre o processo ou potencializar lascamentos prematuros em serviço. As imagens podem ser visualizadas na Figura 4.9 e 4.10.

Figura 4.9 – Broca sem preparação de gume – Ferramenta “A”



Fonte: O autor

Figura 4.10 – Broca com preparação de gume - Ferramenta “B”

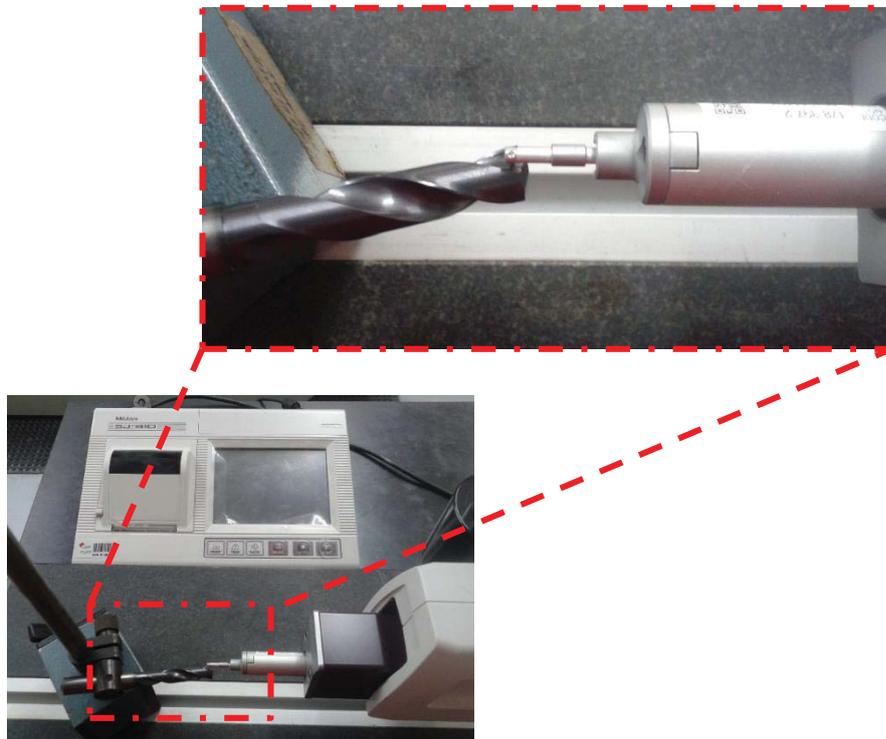


Fonte: O autor

Nota-se na Figura 4.9 as marcas deixadas pelo processo de retificação da broca. Estas saliências podem ser possíveis pontos de concentração de tensão, o que aumenta a possibilidade de uma quebra prematura em serviço quando submetidas a condições mais severas de corte. A figura 4.10 mostra o arredondamento do gume. Observa-se uma suavização da aresta de corte e da textura acima desta região; esta preparação pode aumentar a resistência mecânica do gume.

Para complementar as informações sobre o acabamento das superfícies de corte das brocas, foram realizadas leituras dos valores de rugosidade ( $R_a$ ) nas regiões de corte. Foi utilizado um comprimento de amostragem (*cut-off*) de 0,25 mm devido ao perfil da face ser curvilíneo e superior à margem permitida pelo rugosímetro, mesmo sendo esta faixa de amostragem superior à determinada para valores de rugosidade  $R_a$  entre sulcos (0,02 a 0,1  $\mu\text{m}$ ). A figura 4.11 mostra a região de análise e a Tabela 4.4 mostra os valores médios de 3 medições realizadas no ângulo de saída da ferramenta ( $A\gamma$ ), totalizando 6 leituras em cada ferramenta.

Figura 4.11 - Medição da rugosidade na face das brocas



Fonte: O autor

Tabela 4.4 – Valores médios de rugosidade da face das ferramentas

Broca	Rugosidade média da face ( $R_a$ )	Desvio padrão
A	0,526 $\mu\text{m}$	0,080
B	0,259 $\mu\text{m}$	0,050

Fonte: O autor

### 4.1.3 Pré-testes e ajustes

Foram realizados pré-testes e ajustes para validação dos procedimentos experimentais, tais atividades incluíram: avaliação dos parâmetros de corte; preparação e limpeza da máquina

ferramenta; manipulação, verificação da quantidade e ajuste da vazão dos fluídos lubrificantes; comportamento do material-base em serviço; ajuste do dispositivo de fixação cone/ferramenta para avaliação no estéreo microscópio; e fabricação de um dispositivo de fixação da broca na mesa do microscópio eletrônico de varredura. As informações geradas no pré-teste foram registradas em planilhas e documentas através de imagens. Em decorrência da similaridade nos resultados e a grande quantidade de informações, não foram anexadas aos resultados finais. Porém, elas serviram como referências técnicas para o desenvolvimento dos ensaios finais.

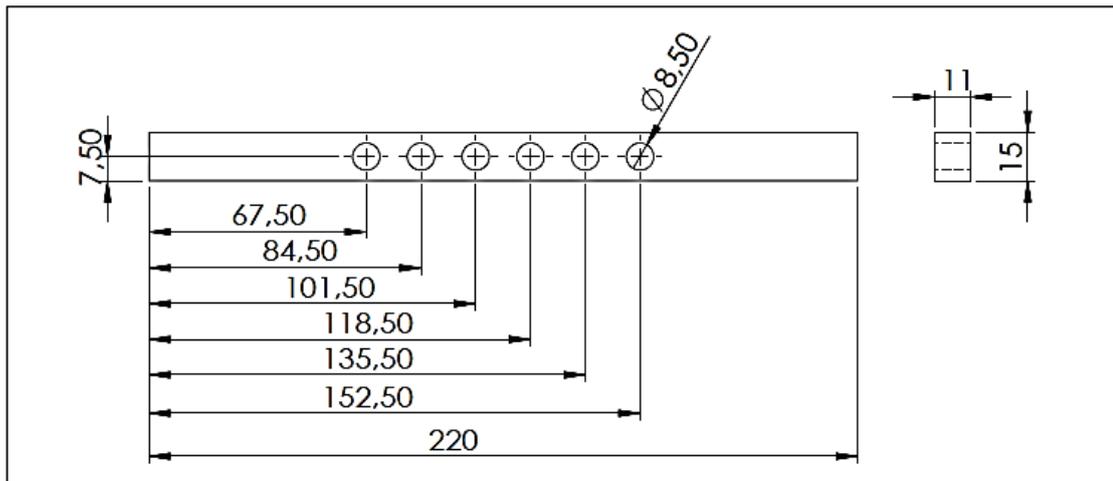
## **4.2 Segunda Etapa**

Neste subitem serão apresentados os métodos utilizados para preparação e os procedimentos sobre os ensaios definitivos, onde foram cuidadosamente repetidos os ensaios da primeira etapa e ao final dos ensaios experimentais foram realizadas análises estatísticas sobre os valores medidos.

### **4.2.1 Corpos de Prova para Furação**

Os corpos de prova (CP's) foram extraídos de uma chapa quadrada com dimensões de 500 mm x 500 mm x 12 mm. Para melhorar a fixação dos CP's na morsa do centro de usinagem, foram retiradas amostras retangulares da chapa, com a auxílio de uma serra fita vertical e posterior esquadreamento em uma fresadora universal. Foram produzidos 6 (seis) corpos de prova para cada condição de ensaio (ferramenta/Fluído) com um total de 36 CP's com dimensões finais de 220 mm x 15 mm x 11 mm, conforme Figura 4.12. A estratégia adotada foi de furações em cheio, sem furo de centro e passante. Este critério foi escolhido pela boa rigidez da máquina, pela espessura de chapa ser considerada “intermediária” e pela dureza do material-base não ser considerada elevada com base nos pré-testes realizados. As distâncias entre furos foram mantidas em 17 mm (2x o diâmetro da broca).

Figura 4.12 – Corpo de prova para furação



Fonte: O autor

#### 4.2.2 Preparação das Ferramentas de Corte

A reafiação das brocas utilizadas neste trabalho, foram realizadas pela empresa WM Tools, de Caxias do Sul, autorizada pela fabricante das ferramentas Titex a reproduzir as geometrias originais. Os programas de reafiação e arredondamentos da mesogeometria, a composição do material abrasivo utilizado para realizar o processo de preparação da mesogeometria, entre outras informações específicas sobre o processo, não foram repassadas pela empresa, pois trata-se de um sistema controlado e sigiloso de fabricação.

No processo de arredondamento da mesogeometria, a broca permaneceu imersa no meio abrasivo cerca de 10 min, sendo modificado o sentido de rotação a cada 5 min aproximadamente. A máquina utilizada foi uma OTEC, modelo DF-3 Tool (ANEXO, figura B.1 em “B”). O equipamento utilizado para reafiar as brocas foi uma afiadora CNC Schleifring 5 eixos com comando Tool Studion (ANEXO, figura B.1 em “A”). O revestimento de TiAlN foi efetuado pela empresa Oerlikon-Balzers, em Caxias do Sul, sendo que o acompanhamento do processo de revestimento não foi autorizado pela empresa.

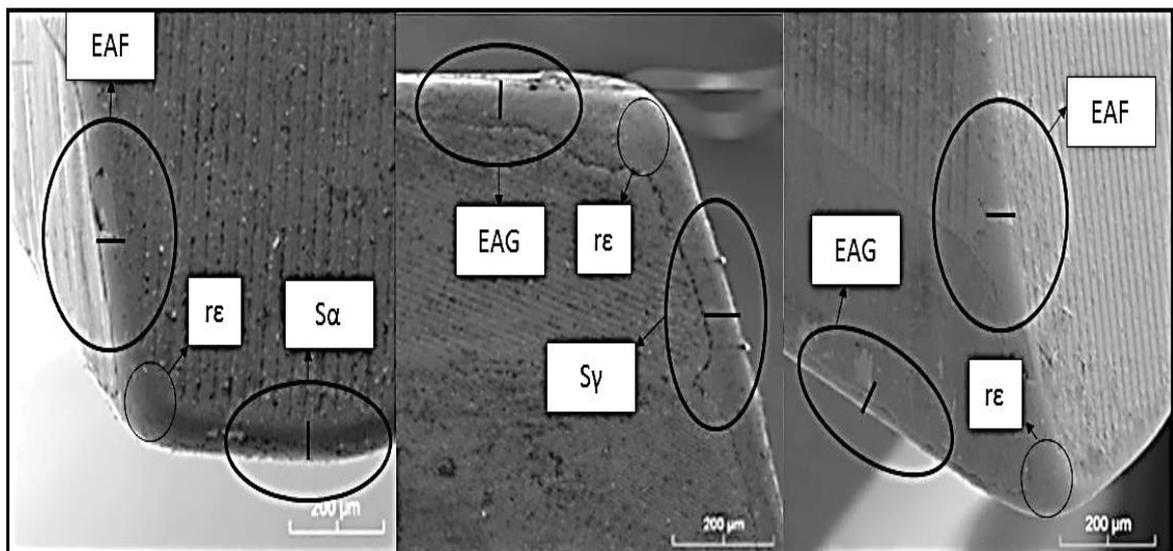
#### 4.2.3 Caracterização Dimensional da Mesogeometria Utilizada

Para avaliar a extensão do arredondamento da mesogeometria da broca foram realizadas imagens utilizando um microscópio eletrônico de varredura (MEV) com aumento de 500x com

auxílio do *software* de medição do próprio equipamento (*VEGA LM 3*). Para medição das regiões da quina, face e guia, as medições realizadas são projeções do raio.

As regiões mensuradas estão ilustradas na Figura 4.13 e seguem as nomenclaturas de: espessura de arredondamento vista da face e guia (EAG), espessura de arredondamento externo vista da guia e flanco (EAF), espessura de arredondamento vista de flanco ( $S\alpha$ ), espessura de arredondamento vista de face ( $S\gamma$ ) e os raios de quina ( $r\epsilon$ ). Este método de medição foi desenvolvido por Denkena *et al.*, (2002) e devido sua simplicidade de execução segue sendo utilizado (FULEMOVA e ZADENEK, 2014; BORDIN e ZEILMANN 2014; TUSSET, 2015). Não foram encontradas normas que contemplem este tipo de medição.

Figura 4.13 – Mesogeometria da ferramenta utilizada



Fonte: O autor

A Tabela 4.5 mostra estes valores e o cálculo efetuado para identificação do fator K (Equação 1) para a ferramenta com preparação, identificada como “B”.

Tabela 4.5 - Valores medidos da mesogeometria das ferramentas utilizadas

Broca		Flanco (mm)			Face (mm)			Guia (mm)			K= $S\gamma / S\alpha$
		EAF	$S\alpha$	$r\epsilon$	EAG	$S\gamma$	$r\epsilon$	EAG	EAF	$r\epsilon$	
A	Média	-	-	0,02	-	-	0,015	-	-	0,03	0
	Desvio P.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
B	Média	0,061	0,040	0,104	0,067	0,032	0,112	0,066	0,056	0,06	0,8
	Desvio P.	0,004	0,004	-	0,006	0,003	-	0,004	0,008	-	-

\* Os espaços sem indicação de valores correspondem as arestas reafiadadas (sem arredondamento).

Fonte: O autor

#### 4.2.4 Fixação das Ferramentas

Para a fixação das ferramentas, foi utilizado um mandril porta pinça ER40 - BT40 (norma DIN 6499) conforme Figura 4.14. A cada furação (ou seja, nas 36 furações realizadas), foi verificado o erro de batimento radial da ferramenta (na haste e na guia da broca), através de um relógio comparador Mitutoyo série 2, modelo 2110S-10, com resolução de 0,001 mm e exatidão de +/- 0,005 mm.

Figura 4.14 – Verificação do erro de batimento com relógio comparador



Fonte: O autor

A tabela 4.6 mostra os resultados divididos por condição do ensaio (ferramenta e meio lubrificante). Foi medido o batimento a cada furo realizado, pois o porta pinça era retirado da máquina para registro das imagens da ferramenta. Os valores correspondem à média aritmética de 6 furos realizados por condição e o seu respectivo desvio padrão.

Tabela 4.6 – Valores dos erros de batimento medidos

Broca	Condição	Batimento [ $\mu\text{m}$ ]		Desvio padrão
	<i>Lubrificante</i>	<i>Haste</i>	<i>Guia</i>	
A	Seco	15	20	1,3
	MQL	16	19	0,9
	Abundância	16	21	1,0
B	Seco	19	22	1,1
	MQL	16	20	1,4
	Abundância	17	21	0,9

Fonte: O autor

#### 4.2.5 Variáveis de entrada Utilizadas na Experimentação

O processo de furação é bastante complexo devido ao número de variáveis envolvidas. Qualquer alteração no sistema pode potencializar um efeito na ferramenta ou no corpo de prova. Como já foi mencionado, as variáveis de entrada utilizadas neste trabalho foram: as brocas helicoidais de metal duro identificadas como “A” e “B” e diferentes meios lubrificadorres “abundância”, “MQL” e “a seco”.

Como a intenção deste trabalho é avaliar os efeitos causados pelo processo de furação sobre o acabamento superficial da peça e não avaliar a vida da ferramenta e entendendo que a variação dos parâmetros de corte pode alterar significativamente tal acabamento, determinou-se que os parâmetros de corte (velocidade de corte e avanço) seriam constantes. Neste sentido, para determinar os parâmetros de corte, seguiu-se a orientação do catálogo da empresa TITEX fabricante das brocas utilizadas, o qual relaciona as especificações da ferramenta (diâmetro, substrato e revestimento), com a dureza média do material a furar. Assim, os parâmetros foram definidos em velocidade de corte  $v_c = 67$  m/min e avanço  $f = 0,1$  mm/volta para todos os ensaios. Mesmo sendo um parâmetro conservador para ferramentas de metal duro, que segundo DINIZ *et al.*, (2013) brocas de metal duro de 10 mm de diâmetro trabalham na faixa de  $v_c = 200$  m/min, manteve-se a recomendação do fabricante da ferramenta. Outros autores também utilizaram parâmetros de corte na faixa utilizada neste trabalho para materiais com dureza similares (BORDIN, 2013; ZEILMANN *et al.*, 2014).

O Fluido utilizado para o sistema MQL foi o VASCOMILL MKS 22 da marca BLASER SWISSLUBE, à base de ésteres vegetais, não miscível em água, com ponto de fulgor 200°C, viscosidade a 40°C de 22 mm<sup>2</sup>/s e densidade de 0,905 g/cm<sup>3</sup> (BLASER, 2016)

No sistema de lubrificação com emulsão em abundância (8% de óleo com vazão de aproximadamente de 350 l/h) foi utilizado o óleo CASTROL SUPEREDGE 6552, biodegradável, semissintético, isento de cloro, nitrito e fenóis. Segundo o boletim técnico da empresa, o ponto de fulgor não é indicado, devido ao conteúdo de água interferir em tal indicação.

Foi utilizado um planejamento experimental para execução das furações, onde foram realizados 6 furos em cada combinação broca/meio lubrificante, portanto 18 furos com a mesma broca (pois a mesma não apresentou avarias) em cada condição de ferramenta, totalizando 36 furos no total.

#### 4.2.6 Variáveis de Saída Analisadas

Geralmente os valores de rugosidade são utilizados como único parâmetro de aprovação de peças e componentes. Porém, para um controle mais rigoroso do processo faz-se necessário um entendimento dos fenômenos subsuperficiais que possam alterar o material-base da peça. Neste sentido, foram avaliadas as seguintes variáveis de resposta: análise de textura (rugosidade), a camada afetada pelo calor, o perfil de microdureza e o dimensional da rebarba gerada.

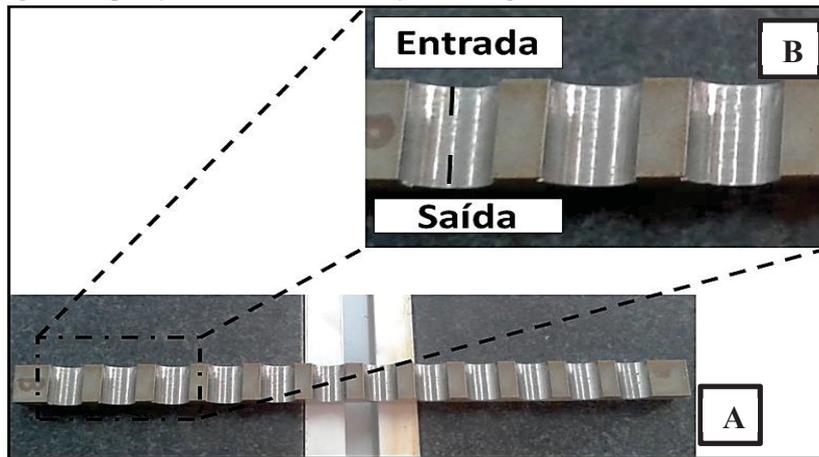
Para tanto, após o processo de furação ter sido concluído, as amostras foram seccionadas na largura (dimensão de 15 mm) no sentido transversal à parede do furo, sendo utilizada a máquina de eletroerosão a fio (Item 4.4.1) para realização do corte. A Figura 4.15 mostra o corpo de prova seccionado. Nos pré-testes realizados não foram localizadas alterações micro estruturais do material-base em virtude de o corte ter sido realizado em uma máquina de eletroerosão a fio, pois a superfície seccionada passou por uma preparação micrográfica, onde a superfície é submetida a um processo de lixamento com uma série de lixas em diferentes granulometrias, a qual pode auxiliar na retirada de alguma a camada alterada pelo corte a fio.

##### 4.2.6.1 Procedimento de Medição de Rugosidade

Os valores de rugosidade foram avaliados utilizando o parâmetro  $R_a$  (rugosidade média), por se tratar de um parâmetro mais representativo do perfil médio ao longo do comprimento total. Foi utilizado um comprimento de amostragem de 0,8 mm (recomendado para  $R_a < 2 \mu\text{m}$ ) e 5 intervalos de medição, com comprimento de avaliação de 4 mm, segundo recomendações da norma NBR 4287. As leituras foram realizadas na entrada e na saída do furo, pois o comprimento de avaliação de 4 mm na entrada e saída percorre praticamente toda a extensão (espessura) da peça de 11 mm.

Para mensurar os valores de rugosidade com maior confiabilidade, foram realizadas 6(seis) medições para cada um dos dois lados da amostra seccionada. A Figura 4.15 em “A” mostra a superfície seccionada ao meio no sentido transversal a parede do furo e em “B” o detalhe do sentido de entrada e saída da broca, que será considerado como referência no posicionamento das análises.

Figura 4.15 - Imagem das posições referentes a medições de rugosidade



Fonte: O autor

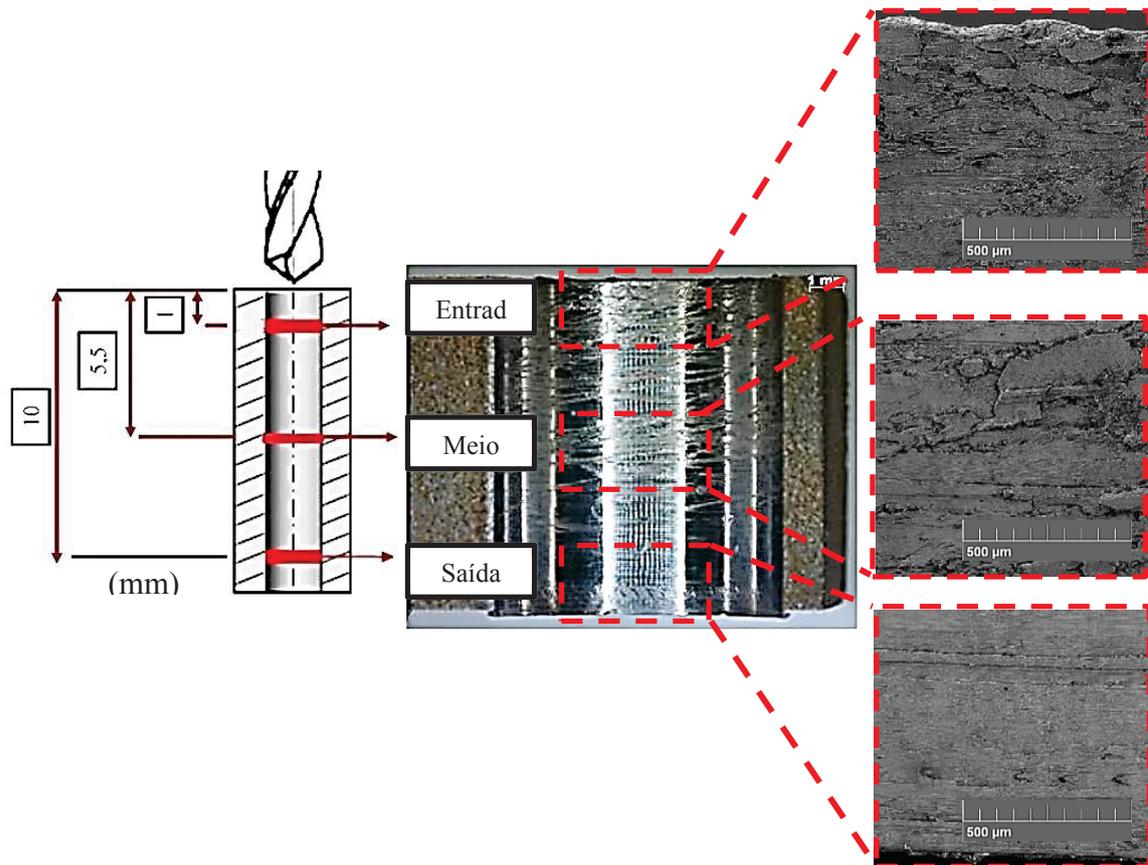
#### 4.2.6.2 Imagem da Textura dos Furos

Para análise superficial da textura dos furos, foram utilizadas técnicas de avaliação em estéreo microscópio com ampliações máximas de 50x e microscopia eletrônica de varredura (MEV), a qual seguiram procedimentos internos do laboratório de microanálise do Parque Científico Tecnológico (UPFParque).

Para realização das imagens em estéreo microscópio a preparação é realizada por uma limpeza em ultrassom por cerca de 3 min em acetona, após, um jato de ar pressurizado é aplicado na broca e uma rápida secagem com ar quente (secador de cabelo). Já em MEV, as amostras (brocas) são submetidas a uma limpeza por ultrassom cerca de 5 min com acetona; após, são submetidos a um jato de ar pressurizado para eliminação de quaisquer partículas de produtos que não façam parte da amostra, em seguida, são fixadas na mesa de trabalho do microscópio com o auxílio de um dispositivo desenvolvido exclusivamente para brocas, as quais são presas no dispositivo por parafusos. A realização das análises em MEV é feita em médio vácuo, utilizando uma tensão de 30 KV e uma distância de trabalho de 15mm, com detector de elétron secundários (BE).

Para a composição das imagens dividiu-se a amostra em três regiões; entrada (1 mm), meio (5,5 mm) e saída (10 mm), como pode ser visto na figura 4.16.

Figura 4.16 – Esquema de visualização da textura dos furos



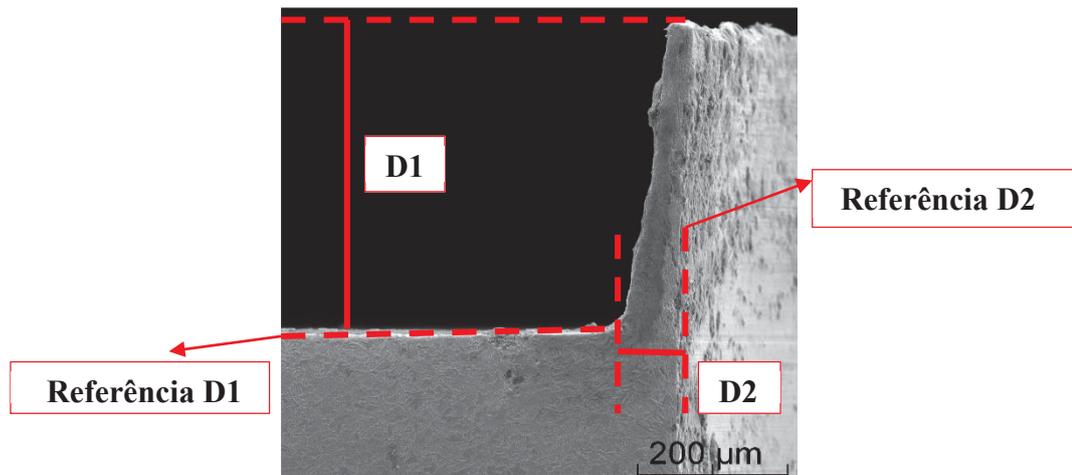
Fonte: O autor

#### 4.2.6.3 Análise da Rebarba na Saída do Furo

Para caracterização da rebarba gerada, foram seguidos os mesmos procedimentos de descritos no item 4.2.6.2 no que se refere a limpeza das amostras, quanto a fixação, esta foi realizada diretamente em cima da mesa de trabalho do microscópio eletrônico de varredura (MEV) através de uma fita dupla face de carbono sem qualquer dispositivo de fixação.

Com a amostra devidamente fixa na mesa de trabalho, os ajustes do equipamento seguiram os procedimentos; realização de médio vácuo, utilizando uma tensão de 30 KV e uma distância de trabalho de 20mm, com detector de elétron secundários (BE). Para execução das medições foram utilizados os recursos do próprio *software* do microscópio (*TESCAN VEGA TC*) através da ferramenta *Measurement (measure distance)*. Foram criadas linhas de referência para orientação das medidas D1 (altura da rebarba) e D2 (espessura da raiz), conforme mostra a Figura 4.17.

Figura 4.17 - Esquema de orientação das medidas realizadas na rebarba gerada na saída dos furos



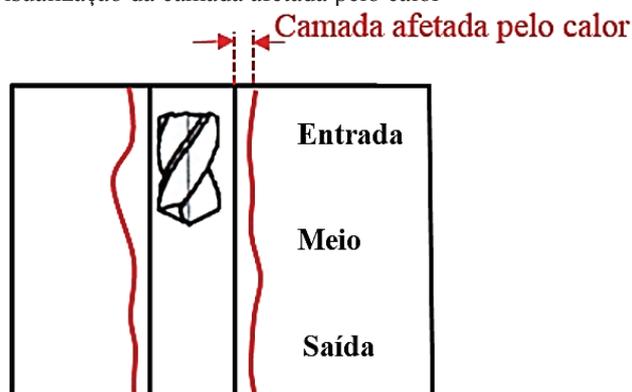
Fonte: O autor

#### 4.2.6.4 Avaliação da Camada Afetada pelo Calor

Para a avaliação e medição da camada afetada pelo calor (CAC), as amostras passaram pelos mesmos procedimentos micrográficos descritos no item 4.2.1 em relação à preparação (lixamento, polimento e ataque químico dos corpos de prova). Na medição da camada afetada pelo calor, foram utilizados os mesmos critérios por regiões: entrada, meio e saída. Para realização das medições da CAC foi utilizado o software *TESCAN VEGA TC* do próprio MEV, que possui uma ferramenta de medição.

Foram realizadas 36 furações no total, sendo 18 furos utilizando cada ferramenta (6 furos para cada condição de Fluido). Portanto, foram realizadas 54 micrografias para cada broca utilizada. No total, foram realizadas 108 micrografias para caracterização da camada afetada pelo calor. A Figura 4.18 ilustra as regiões analisadas.

Figura 4.18 - Esquema de visualização da camada afetada pelo calor



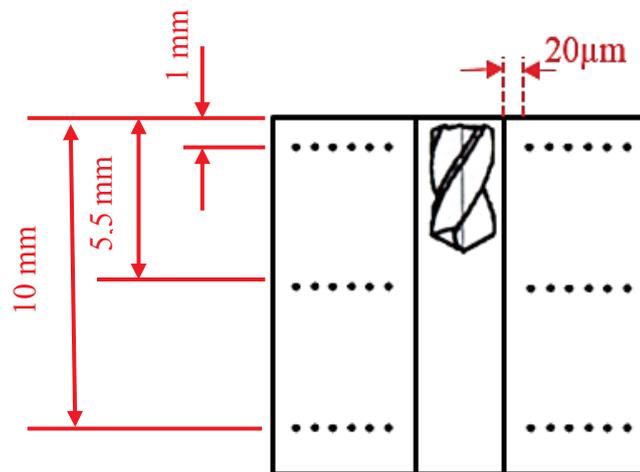
Fonte: O autor

#### 4.2.6.5 Medição do Perfil de Dureza

Para caracterização do perfil de microdureza na borda do furo, as leituras seguiram os critérios da norma NBR NM ISO 6507-1, a qual sugere que a impressão seja mantida a uma distância de no mínimo 2,5 vezes o comprimento médio da diagonal medida em um ponto de leitura no metal-base, para restringir o efeito de “deformação de borda” entre as indentações e na borda do furo. As amostras foram avaliadas nas três regiões: entrada (1 mm), meio (5,5 mm) e saída (10 mm), sendo que foram realizados 6 perfis de microdureza para cada furo realizado. (isto é, 36 perfis para cada condição ferramenta/Fluído avaliada), totalizando 108 perfis medidos.

Cada perfil de microdureza representa a média de 6 conjuntos de dados com seu respectivo desvio. Neste trabalho foi adotado 20  $\mu\text{m}$  de distância da borda do furo e entre indentações. A Figura 4.19 mostra as regiões analisadas

Figura 4.19 - Esquema de visualização das leituras de microdureza



Fonte: O autor

#### 4.2.7 Análise Estatística

Para avaliar se existem mudanças significativas entre as variáveis utilizadas, foi necessário delinear um plano experimental para realização dos ensaios.

O experimento foi conduzido dentro de um planejamento experimental fatorial 3x2 com Análise de Variância (ANOVA) no nível de significância de 5% para comparação das médias, utilizando o *Software* livre Sisvar 5.0.

Neste trabalho foram comparados dois fatores (ferramentas e condições de lubrificação). Para cada fator, os tratamentos são diferentes: duas ferramentas (A e B) e três condições de lubrificação (abundância, MQL e a seco).

Foram analisados: valores médios de rugosidade, dimensional da rebarba gerada no processo de furação, a camada afetada pelo calor (CAC) e o perfil de microdureza.

Os resultados das análises serão apresentados no Capítulo 5 através de gráficos obtidos pelos valores medidos e as suas respectivas dispersões. As análises estatísticas e os testes comparativos entre as médias (Tukey) foram realizadas para todas as variações propostas e os resultados estão apresentados no APÊNDICE.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Com base na revisão bibliográfica, foi possível observar que existem opiniões distintas sobre a correlação entre a preparação da mesogeometria e uma melhora no acabamento superficial. Os estudos apontam que alguns fatores estão atrelados à uma boa condição de acabamento: a magnitude da preparação dos gumes, a resistência mecânica, as deformações envolvidas no processo, os parâmetros de usinagem e a condição de aplicação dos meios lubrificantes são elementos que podem apresentar variações sobre a qualidade da peça usinada.

Neste sentido, foram avaliadas algumas variáveis que podem fornecer informações sobre os efeitos causados pela preparação da ferramenta e sobre a variação das condições de aplicação dos fluidos de corte sobre os valores de rugosidade, camada afetada pelo calor, dimensional da rebarba e o perfil de microdureza nas regiões próximas às bordas dos furos.

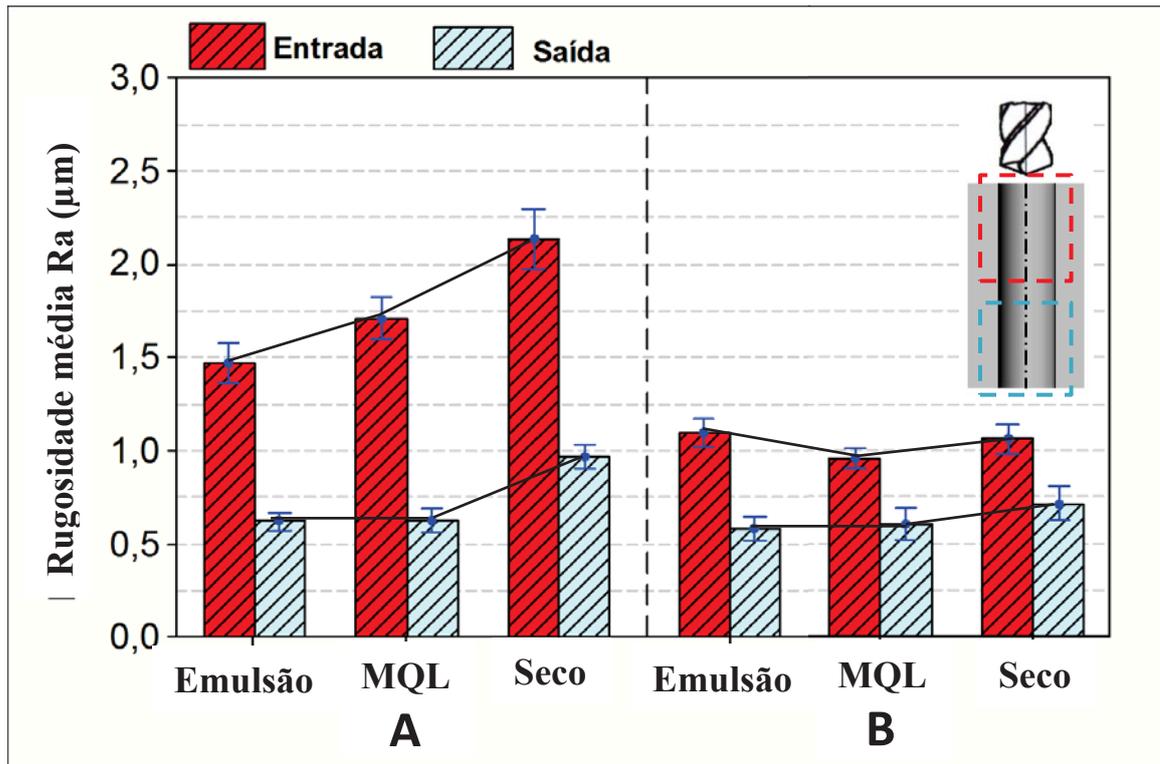
As imagens apresentadas são representativas das 36 furações realizadas. Entretanto, devido à quantidade de imagens geradas e às semelhanças entre si dentro de cada condição (broca/Fluido), são apresentadas apenas três amostras, sendo uma de cada variável analisada.

### 5.1 Rugosidade e Textura dos Furos

A medição dos valores de rugosidade é uma das principais formas de qualificar uma superfície usinada, pois dependendo da aplicação da peça, o grau de acabamento da superfície pode ser determinante tanto para uma vida útil prolongada quanto para uma falha catastrófica em serviço (MARCHIORI, 2013).

A Figura 5.1 representa os valores médios da rugosidade mensurados na entrada e saída dos furos em função das condições de aplicação dos fluidos - emulsão (abundância), MQL e a seco, utilizando duas brocas - A (sem) e B (com) preparação da mesogeometria. Os valores representam a média de 6 ensaios realizados para cada condição ferramenta/fluido.

Figura 5.1 – Valores médios de rugosidade *versus* os Fluidos lubrificadorrefrigerantes e as ferramentas sem preparação (A) e com preparação (B)



Fonte: O autor

Através da Figura 5.1, é possível identificar que os valores médios de rugosidade foram menores para as furações realizadas com a ferramenta B (com preparação).

Para avaliar a influência da preparação da ferramenta, pode-se desconsiderar a severidade do corte a seco e com mínima quantidade de lubrificante (MQL) e verificar apenas o efeito da mesogeometria da ferramenta sobre os valores de rugosidade, comparando os ensaios das ferramentas “A” e “B” apenas com o Fluido em emulsão (abundância). Percebe-se que, mesmo em uma condição mais favorável para o corte, onde a utilização do Fluido pode contribuir com suas funções primárias, os valores médios de rugosidade nas furações em que foi utilizada a ferramenta sem preparação da mesogeometria foram maiores. Assim, estes resultados mostram uma possível influência das condições de preparação da mesogeometria sobre os valores médios de rugosidade (Ra) nas condições analisadas.

A preparação da mesogeometria pode ter contribuído com o melhor acabamento superficial, principalmente da ponta da ferramenta. O arredondamento dos gumes (guias, raios de quina, arestas principais de corte) provavelmente reduziu os defeitos da cunha (microtrincas e irregularidades) e, assim, as regiões de concentração de tensão. Com a suavização dos gumes,

há um aumento da resistência mecânica da mesogeometria e uma distribuição uniforme das tensões cisalhantes, o que pode ter contribuído para uma furação mais estável e com valores de rugosidade reduzidos. Também é possível notar que os valores de rugosidade na entrada dos furos foram superiores em ambas as condições de preparação da ferramenta, em comparação com a saída dos furos, fato que merece uma investigação.

### 5.1.1 Ferramentas “A” e “B” - Entrada dos furos

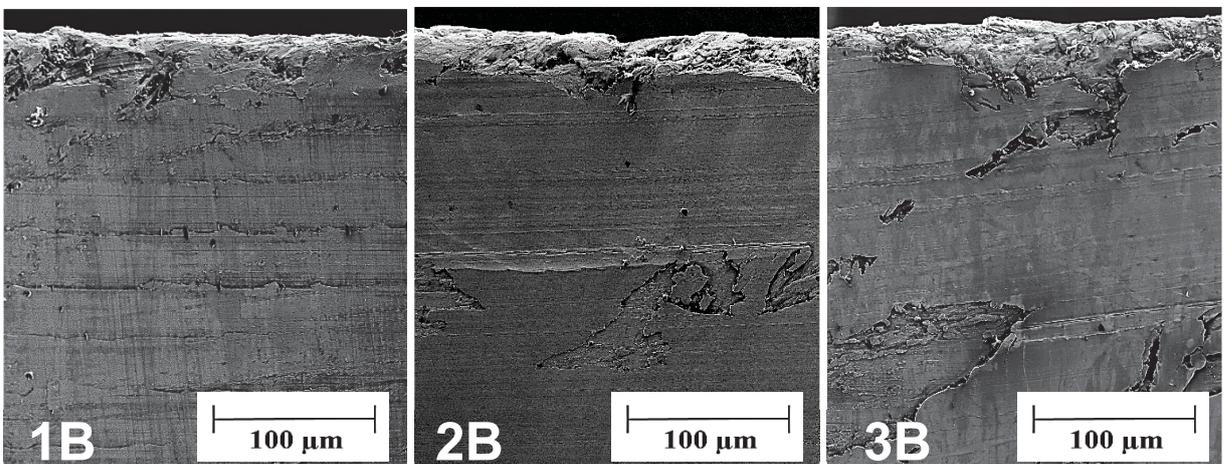
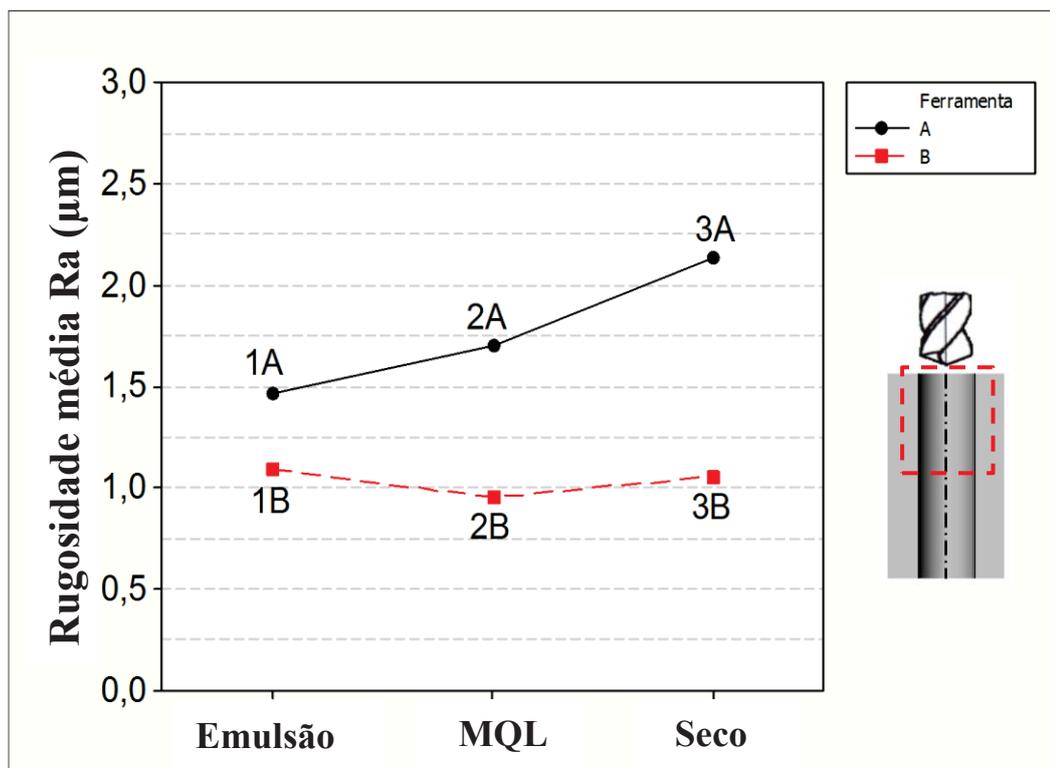
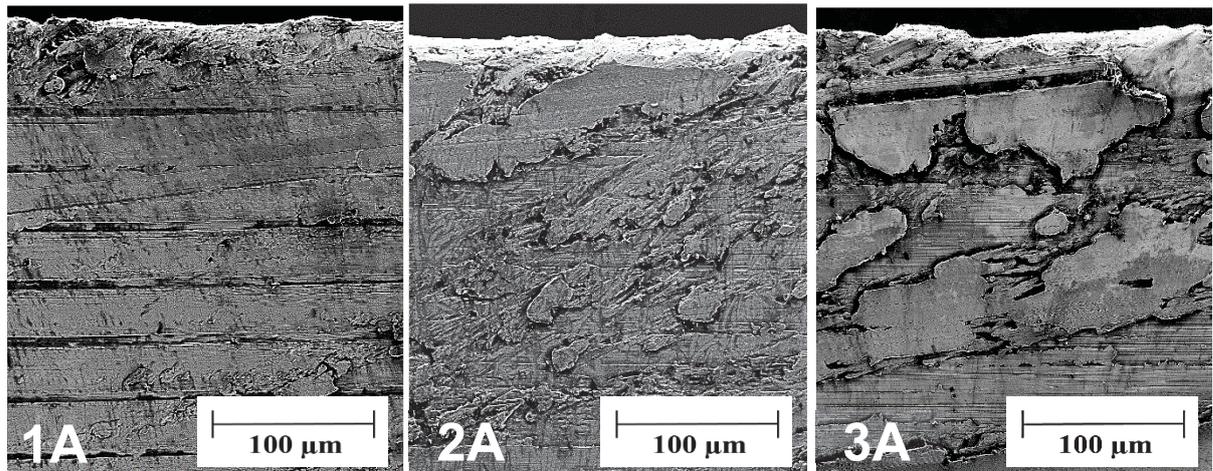
Para a apreciação das variações dos valores medidos de rugosidade na entrada dos furos, faz-se necessário uma avaliação mais criteriosa da textura da superfície usinada nesta região. Com isto, foram realizadas imagens das texturas da superfície dos furos, utilizando microscopia eletrônica de varredura (MEV) com ampliações de 500x, na tentativa de localizar elementos que justificassem a variação encontrada nos valores medidos. Em seguida, foi plotado um gráfico de interações entre ferramentas/fluídos *versus* valores médios de rugosidade. A figura 5.2 mostra estas condições.

Verifica-se, na Figura 5.2 que na ferramenta “A” os valores médios de rugosidade apresentam um aumento proporcional à restrição da aplicação do Fluído, ou seja, conforme há uma redução da quantidade de Fluído, os valores de rugosidade tendem a aumentar.

Analisando as superfícies de textura da ferramenta “A”, um fenômeno chama a atenção: observa-se pequenas porções de material depositado sobre as superfícies das paredes dos furos. O sistema de aplicação com MQL e a seco (textura 2A, 3A) mostra estas porções de material aderido na forma de pequenas escamas “alisadas”, não homogêneas e em alto relevo, na superfície usinada (caldeamento). Na condição com Fluído em abundância (1A) este fenômeno se mostrou de forma mais discreta, juntamente com marcas bem definidas à passagem da ferramenta. Na condição com aplicação de Fluído em abundância (1A), o valor médio de rugosidade mensurado foi de 1,5  $\mu\text{m}$ , sendo este o menor valor médio de rugosidade entre as condições analisadas. Com aplicação do Fluído com MQL (2A), o valor médio de rugosidade foi de 1,7  $\mu\text{m}$ , sendo este um valor intermediário entre as condições de aplicação dos fluídos. Já na condição a seco (3A), o valor médio de rugosidade medido foi de 2,2  $\mu\text{m}$ , correspondendo ao maior valor de rugosidade dentro deste grupo.

Neste sentido, os resultados apontam que, para a condição da ferramenta sem preparação da mesogeometria, a rugosidade foi influenciada pela severidade do processo de corte em relação à quantidade de Fluído lubrificante utilizado (Apêndice, Tabela A.3).

Figura 5.2 - Valores de rugosidade *versus* Fluidos com as texturas da superfície na Entrada dos furos



Fonte: O autor

O fato de a ferramenta sem preparação e a condição a seco apresentarem os maiores valores de rugosidade pode ter sido influenciado pela severidade do corte nesta condição. Neste caso, a furação apresenta uma carência das funções primárias dos fluídos, o que pode ter contribuído para o aumento do atrito na interface ferramenta/cavaco/peça; conseqüentemente, a temperatura na região do corte pode apresentar um incremento. Com isto, a resistência mecânica do material da peça é reduzida e pequenas porções do cavaco gerado pelo corte (em altas temperaturas) são empurradas (comprimidas) contra a parede do furo, formando uma superfície não homogênea, com valores médios de rugosidade variáveis.

No sistema de mínima quantidade de lubrificante (MQL) percebe-se porções de material “caldeado” na superfície do furo, em menor quantidade quando comparado ao corte a seco. Esta ocorrência também pode ter ligação com o fenômeno descrito anteriormente. Neste caso, o Fluido apresenta certa deficiência nas condições de refrigeração que, praticamente, são feitas pelo ar comprimido do sistema, não garantindo uma boa eficiência. A lubrificação é mantida pelo óleo do sistema (MQL) que é posicionado próximo à entrada do furo através de um bico externo (neste caso). Este óleo pode se aderir na superfície da parede do furo, formando uma fina película (microfilme) de óleo, o que pode ter reduzido o atrito do cavaco e da ferramenta, facilitando o escoamento deste para fora do furo e, por consequência, reduzindo a quantidade destas porções de cavaco sobre a região usinada.

A condição de furação com fluido em abundância apresentou os menores valores de rugosidade em relação às outras condições. Este fato pode ser explicado pela emulsão em abundância contribuir com a redução do atrito entre o conjunto ferramenta/cavaco/parede do furo, proporcionando boa refrigeração e lubrificação, e permitindo que o cavaco escoe com mais facilidade para fora do furo, auxiliando na redução dos valores de rugosidade.

Como mencionado anteriormente, a ferramenta “B” apresentou os menores valores de rugosidade nas condições analisadas. Através dos valores medidos e apresentados na Figura 5.2, percebe-se que praticamente não há variação significativa entre os diferentes sistemas de aplicação dos fluídos (Apêndice, Tabela A.7). Porém, o mesmo fenômeno (material aderido) identificado anteriormente foi observado nos furos usinados pela ferramenta ‘B’, mas com uma extensão de recobrimento muito superior àquela identificada nas texturas da furação com a broca “A”. Este material “caldeado” na superfície de furo plastificou-se em, praticamente, toda a região analisada na entrada dos furos onde foi utilizado os sistemas MQL e a seco, criando uma nova área de contato sobreposta, com poucas marcas de reentrâncias e irregularidades.

Observando a textura da furação a seco (3B) constata-se a presença deste material aderido na forma de uma escama “alisada” ao longo de aproximadamente toda a extensão do furo; nesta região os valores médios de rugosidade foram na ordem de  $1,1 \mu\text{m}$ . Esta ocorrência pode ter sido influenciada pelo fato de a mesogeometria da broca apresentar um arredondamento das partes cortantes, o que pode contribuir para a modificação da mecânica do corte, aumentando as tensões à frente do gume e provavelmente induzindo ao aumento da temperatura desta região. O fato de a ferramenta “B” apresentar um fator de forma ou fator que relaciona a inclinação (K) de 0,8 (Tabela 4.5) faz com que a dimensão ( $S\alpha$ ) tenha uma dimensão horizontal maior, o que provavelmente pode ter contribuído para que parte do cavaco escoe para baixo do ângulo de folga da broca, sendo pressionado e plastificado contra a superfície usinada e deixando a parede “analísada” do furo menos irregular, a qual pode ter sido responsável pela redução dos valores da rugosidade.

O mesmo fenômeno de “caldeamento” foi observado pela condição de aplicação do Fluido em mínima quantidade de lubrificante (MQL), como pode ser visualizado na imagem da textura 2B, onde identificou-se algumas marcas irregulares à passagem da ferramenta e material aderido na superfície em, praticamente, toda a extensão da superfície usinada; os valores de rugosidade apresentaram-se na ordem de  $0,9 \mu\text{m}$ .

Na imagem 1B, na furação com Fluido em abundância, a rugosidade apresenta valores na ordem de  $1,1 \mu\text{m}$  e a textura mostra pouco material aderido sobre a superfície usinada e algumas marcas da passagem da ferramenta. Nota-se que as irregularidades são reduzidas em comparação com a mesma condição da ferramenta “A” (com Fluido em abundância). Isto pode estar relacionado com o maior arredondamento dos raios de quina e das guias da broca, o que provavelmente esteja promovendo um “alisamento” da superfície usinada e por isso as marcas de avanço estão menos nítidas nesta condição.

Para validar a hipótese de material aderido na superfície usinada, foram realizadas micrografias no material usinado (DIN S700MC) através de microscopia eletrônica de varredura (MEV) com ampliação de 2000x na seção transversal ao furo.

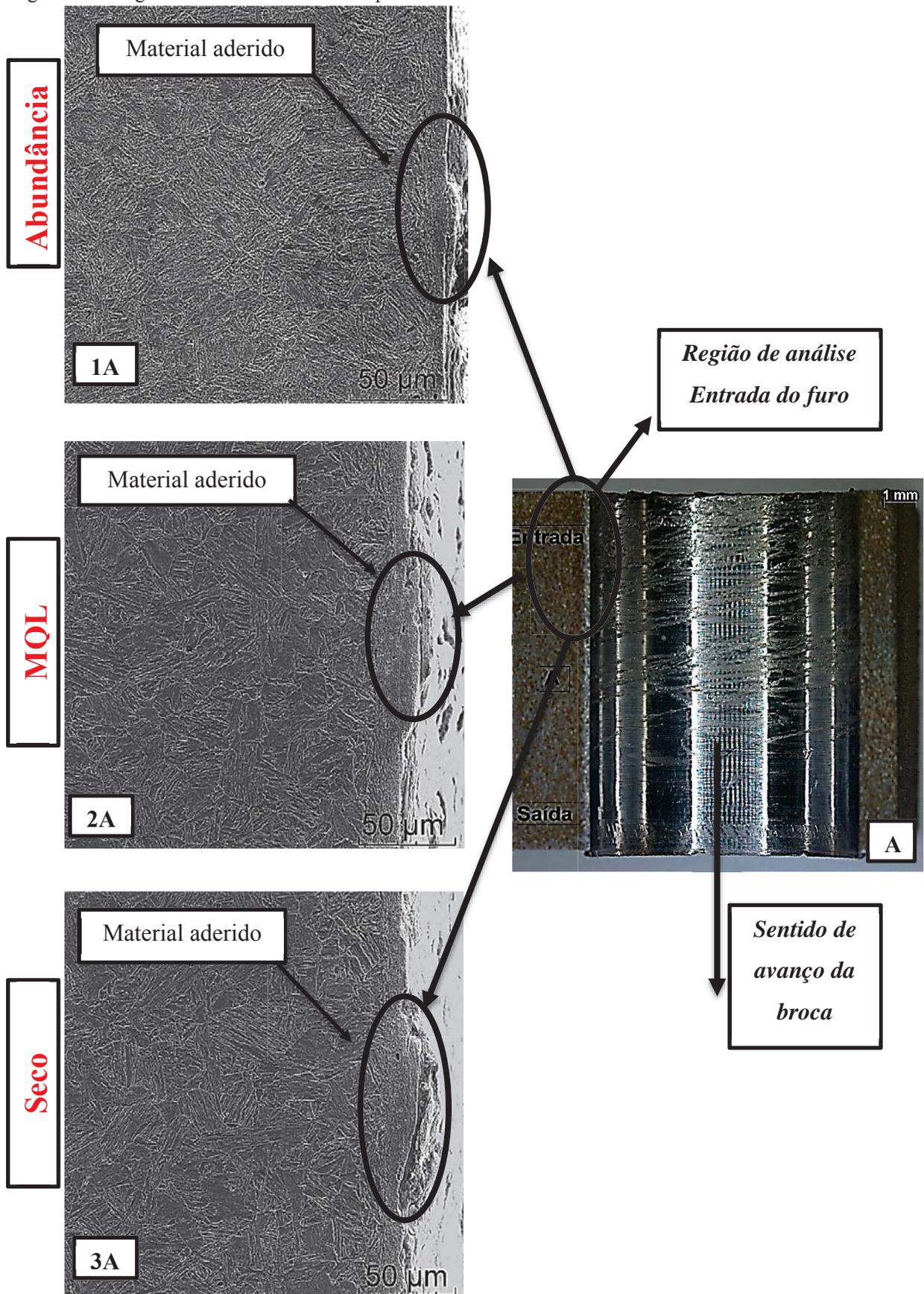
As análises foram realizadas na entrada, meio e saída dos furos de todas as variáveis testadas. Contudo, as análises serão representadas pelas imagens da superfície que foram usinadas com a ferramenta A (sem preparação de mesogeometria), a qual apresentou os maiores valores de rugosidade, e somente uma imagem de cada condição da entrada dos furos, onde os fenômenos foram mais acentuados devido à quantidade e similaridade das imagens geradas.

A Figura 5.3 representa as furações descritas. Em “A” observa-se uma visão geral da superfície usinada (seccionada) e o sentido do movimento de avanço da broca. A imagem 1ª representa as amostras da furação com Fluido em abundância, a imagem 2A representa as amostras com MQL e a imagem 3A representa as amostras totalmente sem Fluido. O objetivo destas imagens é identificar a presença do material aderido na parede do furo e observar sua extensão (ou avaliar se este material está “soldado” na parede do furo), na tentativa de explicar o comportamento irregular dos valores de rugosidade ao longo da superfície usinada.

Como pode ser visualizado na Figura 5.3, há indicativo da presença de material aderido sobre a superfície do furo. As imagens 2A e 3A representam as condições mais severas de corte, as quais mostram um volume de material mais acentuado em comparação com a imagem 1A. Estas porções de material sobrepostas na superfície de entrada podem ter contribuído para alterar o perfil de rugosidade das amostras analisadas.

Este fato pode ser atribuído ao fluxo plástico do material, que é forçado pela ferramenta de corte na entrada do furo. O material se deforma no mesmo sentido do movimento de avanço, provavelmente fazendo com que as fibras (grãos) do material ao redor da broca acompanhem este movimento. Quando a tensão de cisalhamento do material é ultrapassada pelas forças de corte, o cavaco recém-formado pela quina/guia da broca se atrita contra a parede do furo. Parte desse cavaco é expulso da região de corte e outras porções de material ficam em contato por mais tempo na região de entrada do furo, à medida que a broca avança (penetra) no material-base até ultrapassar a espessura total da chapa. A resistência mecânica no local do corte tende a diminuir pela redução do material ainda não retirado abaixo da broca. Porém, na entrada do furo, a guia ainda permanece em contato direto com a parede do furo e esta combinação entre o movimento de rotação e o atrito elevado pode contribuir para o aumento do material aderido nesta região.

Figura 5.3 – Região de material aderido da superfície de Entrada do furo



Fonte: O autor

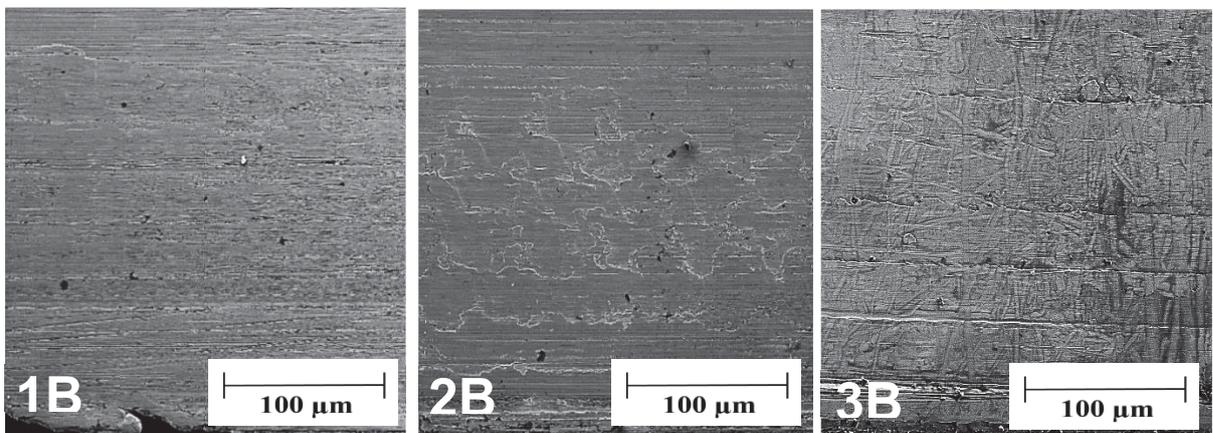
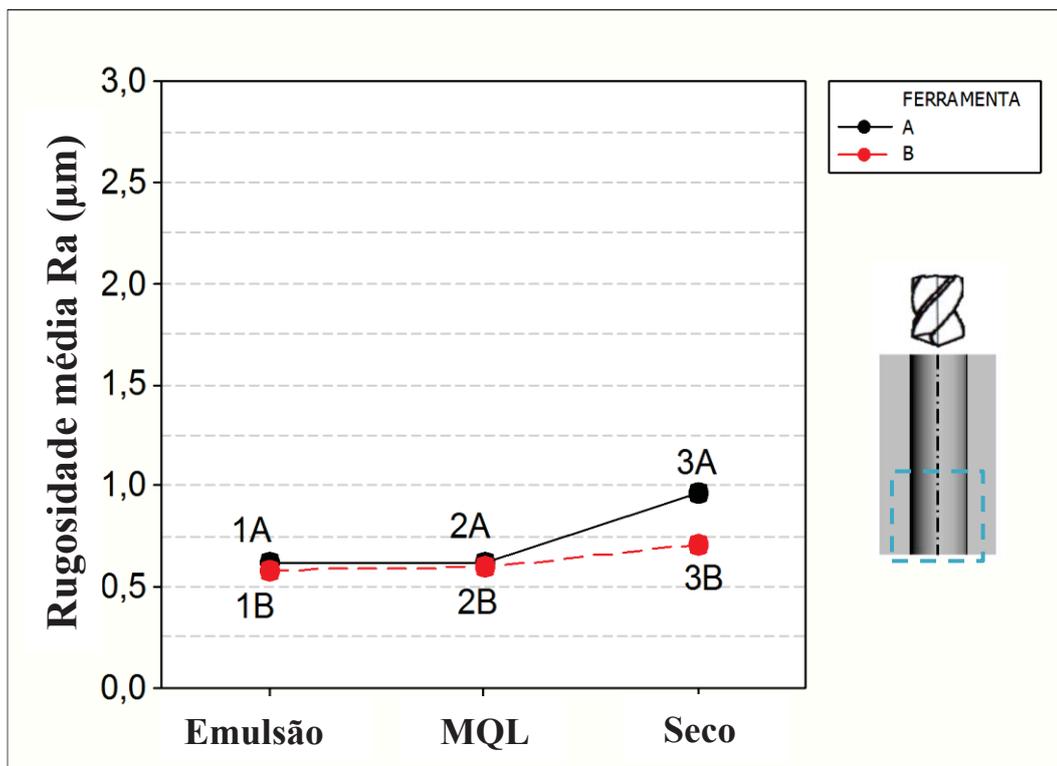
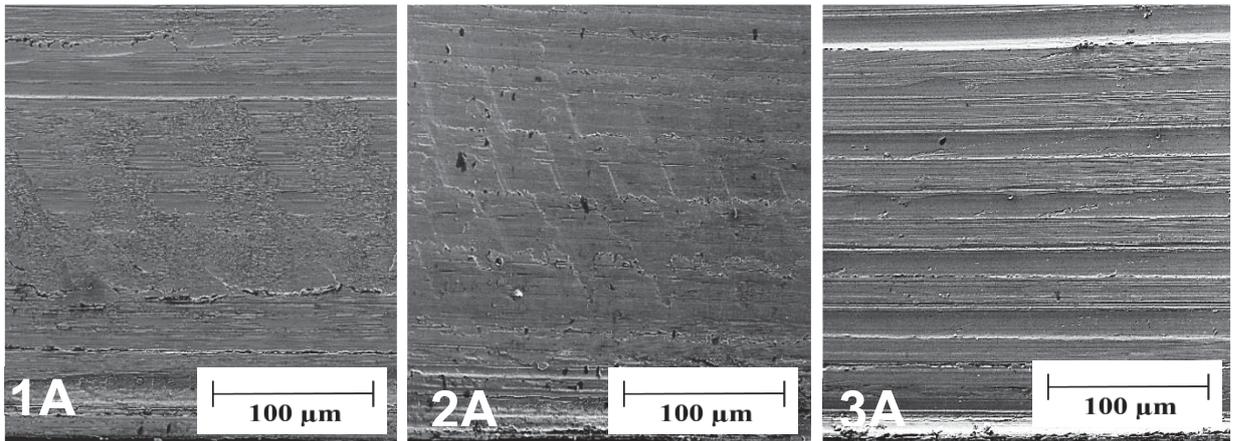
### 5.1.2 Ferramentas “A” e “B” - Saída dos furos

Na tentativa de compreender o comportamento dos valores de rugosidade na superfície de saída dos furos em relação aos valores medidos, faz-se necessário avaliar a textura dos furos usinados. Para isto, o mesmo procedimento do item 5.1.1 foi adotado em relação à geração de um gráfico de interações e análise das texturas geradas; os resultados são visualizados na Figura 5.4.

Nota-se que as texturas da superfície usinada para a saída dos furos são similares e observam-se marcas uniformes e alinhadas transversalmente sem a presença de material aderido, o que pode demonstrar um corte sem vibração (mais estável) nesta região.

Este fato pode ter sido influenciado pela pouca resistência mecânica do material (a ser cortado) após a saída do gume transversal devido a área de sustentação na frente dos gumes ser reduzida. Correlacionado a isto, o tempo de contato (atrito) das guias/quinas com a parede do furo é reduzido em relação à entrada do furo, que permanece em contato com as guias da broca Durante todo tempo de usinagem. Este menor tempo de interação entre as partes cortantes e a parede do furo contribui para que o fenômeno de arrastamento de material seja minimizado e os valores de rugosidade sejam semelhantes em praticamente todas as condições.

Figura 5.4 -- Interação dos valores de rugosidade na Saída dos furos



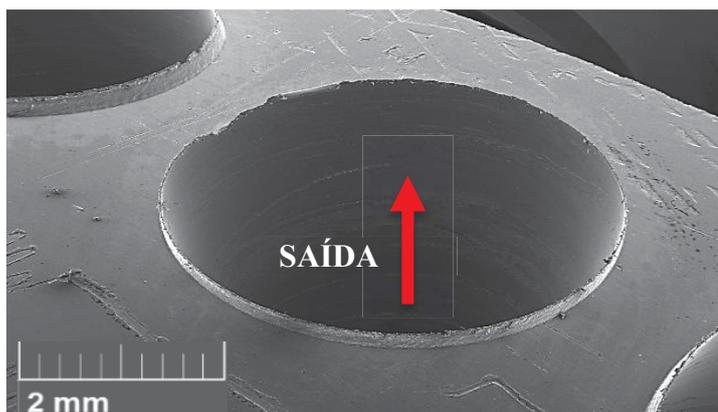
Fonte: O autor

## 5.2 Rebarba

A caracterização dimensional da rebarba gerada durante o processo de furação é uma forma de avaliar e uma tentativa de entender os fenômenos gerados durante o processo de corte. A correta análise de sua ocorrência pode ser uma informação importante na tentativa de minimizar seus efeitos, reduzindo assim os custos de produção e os acidentes com operadores.

Neste sentido, foram realizadas medições na rebarba produzida pelo processo de furação, utilizando as variáveis já descritas. É possível avaliar, de maneira geral, a topografia da rebarba através das imagens geradas pelo MEV. Estas imagens foram realizadas a fim de caracterizar o tipo (forma) da rebarba gerada. Devido à similaridade da morfologia (variando apenas a altura) e a quantidade de imagens geradas, a Figura 5.5 representa a forma geral da rebarba para todas as variáveis envolvidas neste estudo.

Figura 5.5 – Topografia geral da rebarba gerada no processo de furação



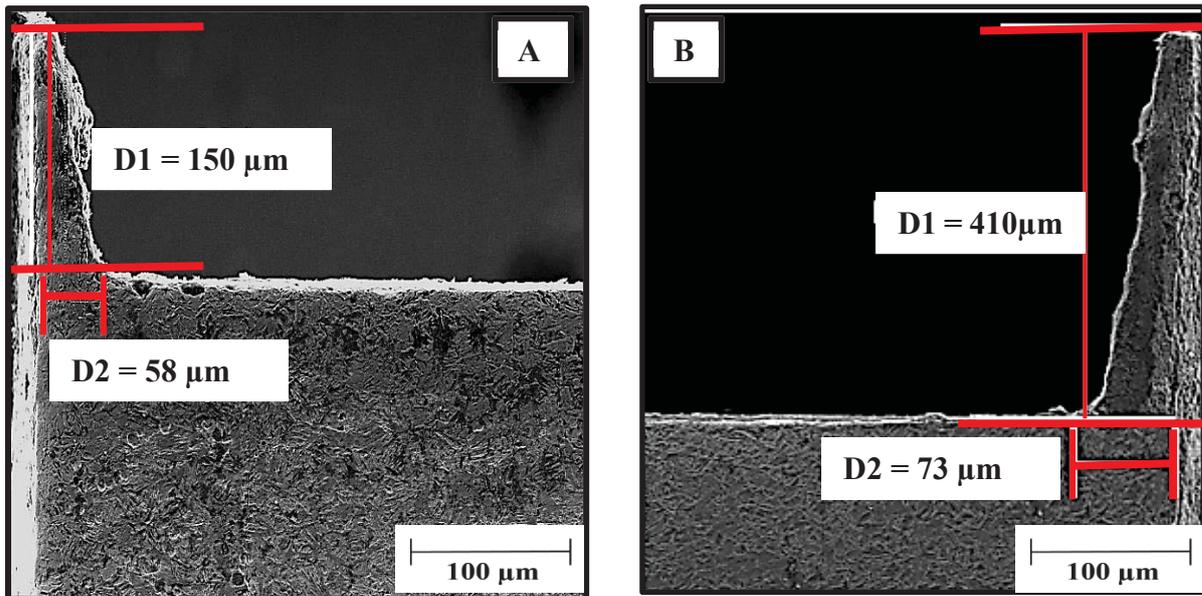
Fonte: O autor

De maneira geral, não foram identificadas projeções de rebarba na entrada dos furos. Esta constatação pode ter sido influenciada pela deformação provocada pela ferramenta na superfície de entrada durante a sua penetração na peça, devido à uma tendência de deformação ou do fluxo plástico do material acompanhar o sentido do movimento de avanço da broca, o que pode impedir a geração de projeções salientes para fora do furo.

Ainda na Figura 5.5, é possível identificar uma rebarba uniforme ao longo de todo o perímetro do furo, o que, segundo a classificação de alguns autores como (MACHADO *et al.*, 2009b; DORNFELD *et al.*, 2009, DORNFELD *et al.*, 2014), enquadra-se como uma rebarba tipo II (chapéu) para as duas condições de ferramenta avaliadas - “A” e “B”.

Para quantificar o dimensional das rebarbas na saída dos furos, seguiu-se o procedimento descrito no item 4.1.1 para corte e preparação metalográfica. Para efeito de comparação, a Figura 5.6 representa as furações feitas com a aplicação de Fluido em abundância, na tentativa de mostrar a topografia da rebarba sem a influência da severidade do corte com sistema MQL e a seco, para as brocas avaliadas, ambas com ampliação de 500x.

Figura 5.6 – Representação da morfologia das rebarbas com a aplicação do Fluido em abundância para as ferramentas sem preparação (A) e com preparação (B).



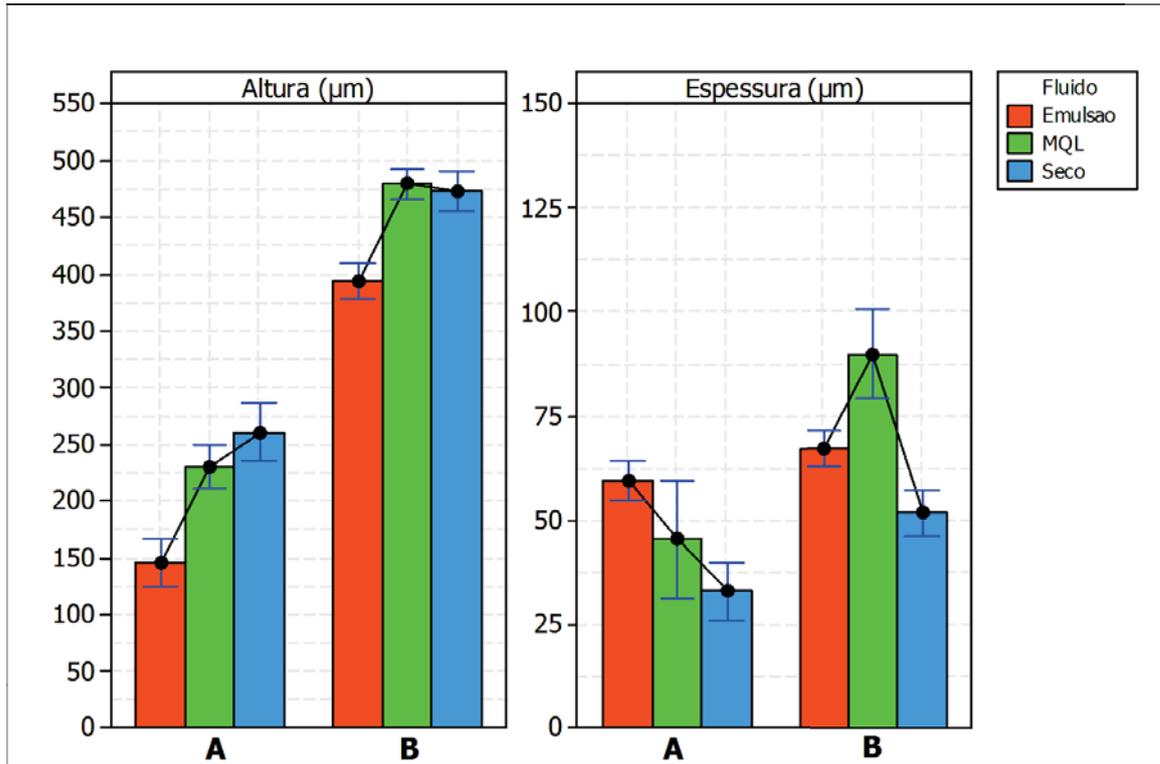
Fonte: O autor

Na Figura 5.6, a dimensão identificada por D1 representa a altura da rebarba e D2 representa a espessura da raiz da rebarba. As imagens mostram a saída dos furos e representam todas as furações realizadas, pois as imagens se apresentaram similares para todas as condições analisadas.

A Figura 5.7 representa os valores estatísticos médios mensurados para a altura (D1) e espessura da raiz (D2) das rebarbas, geradas para ambas as ferramentas e para as diferentes condições de aplicação dos fluídos lubrificantes.

Observa-se um aumento dos valores médios da altura da rebarba com a utilização da ferramenta “B” (com preparação da mesogeometria), em relação à broca “A” (sem preparação), a qual apresentou valores médios menores (Apêndice, Tabela A.12).

Figura 5.7 - Valores médios da altura e espessura das rebarbas geradas pelo processo de furação



Fonte: O autor

Em uma avaliação geral da contribuição da aplicação dos meios lubrificador-refrigerantes correlacionada com as condições das ferramentas analisadas em relação à altura da rebarba, os resultados mostram que a aplicação em abundância apresentou os menores valores e as condições de aplicação com mínima quantidade de lubrificante (MQL) e a seco mostraram semelhanças entre si dado a dispersão dos valores medidos (Apêndice, Tabela A.13).

Na avaliação da variável de resposta dentro do grupo da ferramenta “A”, os valores médios da altura da rebarba foram similares entre si nas condições com (MQL) e a seco em quanto que a condição com aplicação de Fluido em abundância apresentou os menores valores (Apêndice, Tabela A.15).

Já para a ferramenta “B”, o mesmo comportamento foi verificado, onde o sistema em abundância apresentou os menores valores de altura e o sistema de MQL e a seco apresentaram similaridade entre si o que foi comprovado pela análise estatística (Apêndice, Tabela A.16).

O fato de a furação com a ferramenta “B” apresentar as maiores alturas das rebarbas pode ter sido influenciado pela broca ter superfícies arredondadas de corte, com isto, a deformação plástica em frente ao gume fica acentuada. A preparação da mesogeometria apresenta como característica a deformação do material em frente aos gumes e não o

cisalhamento, como acontece com as arestas afiadas. A ocorrência da deformação pode aumentar os esforços de corte e a temperatura local, reduzindo a tensão de cisalhamento do material e facilitando o seu escoamento e a formação da rebarba, seguindo o movimento de avanço da broca.

Nota-se também que, em ambas as ferramentas, a condição de aplicação dos fluidos lubrificantes apresenta a mesma tendência: à medida que a condição de corte é mais severa em relação à aplicação do Fluido, ou seja, MQL e a seco, a altura da rebarba também aumenta com esta variação. Este fenômeno pode ser atribuído ao fato de a aplicação de fluido em abundância se favorecer das funções primárias de lubrificação e refrigeração, reduzindo a temperatura provocada pelo atrito entre cavaco/ferramenta/peça. Este decréscimo faz com que a deformação plástica do material da peça não seja muito acentuada, contribuindo para a redução dos valores da altura da rebarba.

Em relação à espessura da raiz da rebarba gerada na furação, a ferramenta “B” mostrou os maiores valores. Estes resultados podem ter sido influenciados pela maior deformação plástica promovida pelo arredondamento da mesogeometria da broca.

Como já foi mencionado, nesta condição da ferramenta, a mecânica do corte sofre modificações, o que acarreta em maior temperatura, atrito e deformação lateral do material a frente dos gumes (efeito *ploughing* - que significa que parte do material deformado na frente da cunha tenderá a escoar plasticamente para os lados do gume) aumentando a possibilidade do material ser empurrado contra a parede do furo, aumentando assim a raiz da espessura da rebarba gerada na furação nestas condições.

### **5.3 Camada afetada pelo Calor (CAC)**

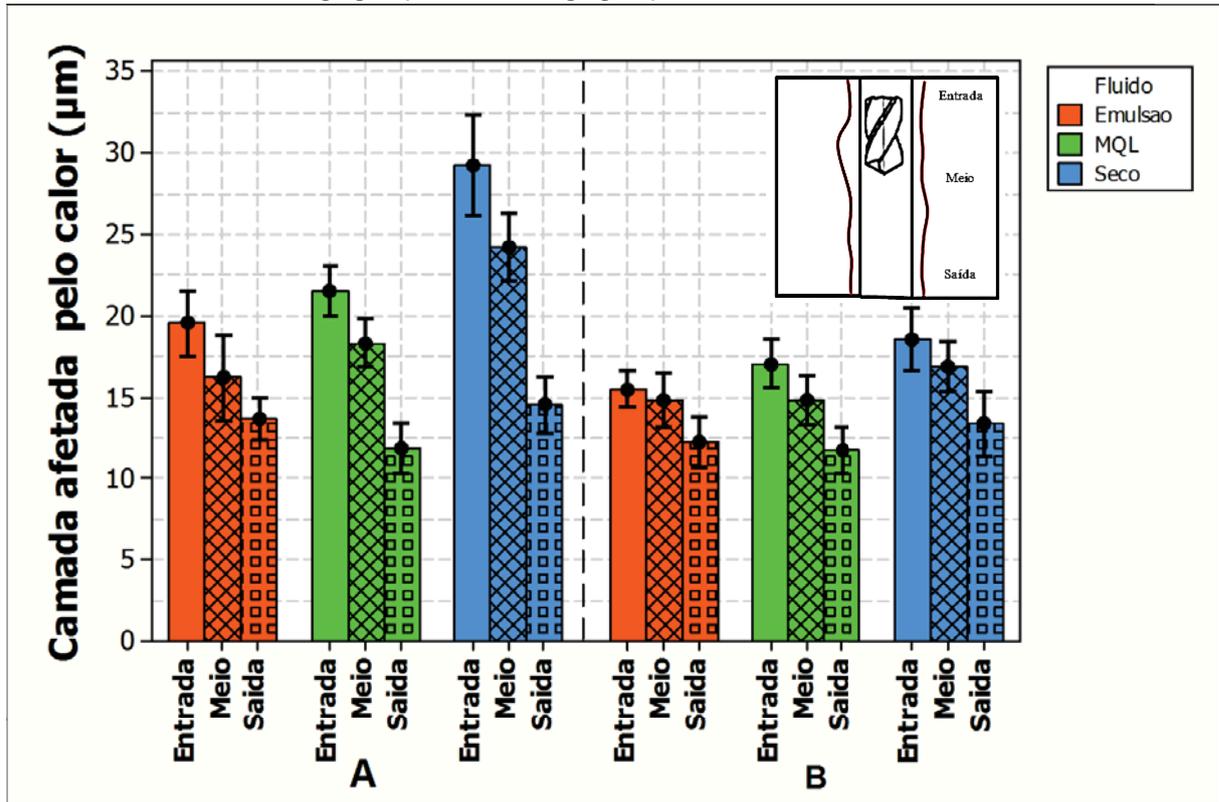
A avaliação da extensão da camada afetada pelo calor promove a ideia da severidade do processo de corte e possibilita a quantificação destes valores. Tais informações são relevantes para o entendimento dos efeitos causados durante a furação com a utilização de diferentes condições de usinagem.

A Figura 5.8 mostra os valores médios medidos ao longo da superfície transversal ao furo, considerando as duas ferramentas e as diferentes condições de aplicação dos fluidos utilizados. As análises foram realizadas na entrada, meio e saída dos furos.

Através da análise dos valores medidos, a ferramenta “A” (sem preparação da mesogeometria) apresentou os maiores valores médios de camada afetada pelo calor (CAC) em

relação à ferramenta “B” (com preparação) (Apêndice, Tabela A.18). Estes resultados mostram um possível indicativo de que a camada afetada pelo calor pode ser influenciada pela preparação da mesogeometria da ferramenta.

Figura 5.8 - Valores médios da camada afetada pelo calor, medidos na entrada, meio e saída dos furos, utilizando as ferramentas sem preparação “A” e com preparação “B”.



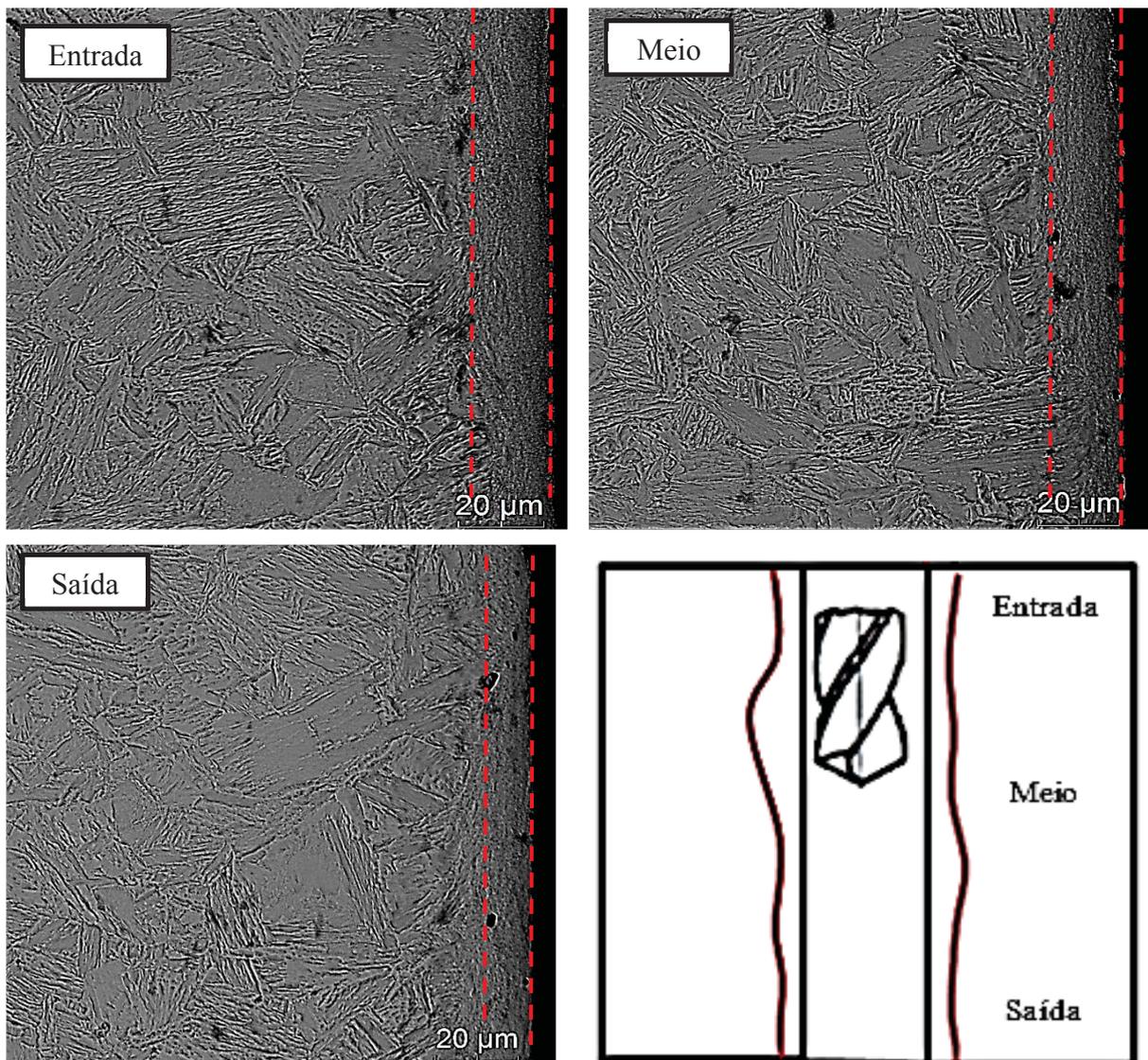
Fonte: O autor

Uma possível explicação para a atenuação da CAC no material base dos furos realizados com a ferramenta “B” pode ser atribuída ao fato desta broca apresentar uma redução dos valores de rugosidade na superfície do ângulo de saída (face) da ferramenta, pois a preparação da mesogeometria através do processo de acabamento por arraste (Item 4.1.2, Figura 4.11 e Tabela 4.4) proporciona um melhor acabamento superficial da ferramenta em comparação com a ferramenta “A”. Este fato pode ter contribuído para facilitar o escoamento do cavaco, reduzindo os atritos gerados entre cavaco/ferramenta/parede do furo, o que pode ter auxiliado na redução da temperatura de corte e, por consequência, da camada afetada pelo calor.

Para visualizar e avaliar estas modificações microestruturais, foram realizadas micrografias na superfície de entrada, meio e saída dos furos, em ambas as ferramentas utilizadas; as Figuras 5.9 e 5.10 representam estas micrografias. Em virtude da quantidade de

imagens geradas e das similaridades entre si será apresentada apenas uma imagem da condição a seco, a qual apresentou os maiores valores de CAC. A linha pontilhada, representa a espessura da CAC em cada região do furo analisado (entrada, meio e saída). As imagens foram realizadas com o auxílio de microscopia eletrônica de varredura com ampliação de 3000x, com detector de elétrons retroespalhados (*backscattering electron* - BSE), seguindo os procedimentos metalográficos (Item 4.1.1) e os procedimentos de geração de imagens (Item 4.1.2).

Figura 5.9 - Representação das camadas afetadas pelo calor – Ferramenta A



Fonte: O autor

Avaliando os resultados da Figura 5.8, percebe-se que dentro do grupo da ferramenta “A”, a condição a seco apresentou os maiores valores de camada afetada pelo calor (CAC); já

o sistema de mínima quantidade de lubrificante e aplicação de fluido em abundância apresentaram os menores valores de CAC e foram estatisticamente similares entre si nas condições analisadas (Apêndice, Tabela A.22).

Apesar dos valores serem estatisticamente similares entre o MQL e na aplicação do fluido em abundância, há uma pequena superioridade nos valores do sistema MQL. Como já é bem conhecido, o sistema com aplicação do fluido em abundância se beneficia de suas funções primárias (refrigeração, lubrificação e escoamento dos cavacos para fora da região usinada), o que reduz o atrito entre a broca/cavaco/peça, reduzindo assim a temperatura.

Na condição analisada, o sistema com MQL apresenta uma tendência de maior temperatura devido à pouca efetividade de refrigeração do sistema, o que pode ter contribuído para este pequeno incremento da CAC. Na furação totalmente a seco, os maiores valores da CAC podem ser justificados pela ausência das funções primárias do fluido, o que pode potencializar o aumento do calor gerado pelo corte e pelo atrito entre as partes, resultando em maiores cargas térmicas.

Analisando o grupo da ferramenta “B”, a condição a seco apresentou os maiores valores de CAC. As condições com sistema de aplicação por mínima quantidade de lubrificante (MQL) e a aplicação de fluido em abundância mostram-se com a mesma tendência da ferramenta sem preparação, onde os valores da CAC foram reduzidos nestas condições, porém com poucas diferenças entre si (Apêndice, Tabela A.23). A figura 5.10 representa as micrografias realizadas nas furações com a ferramenta “B” a seco.

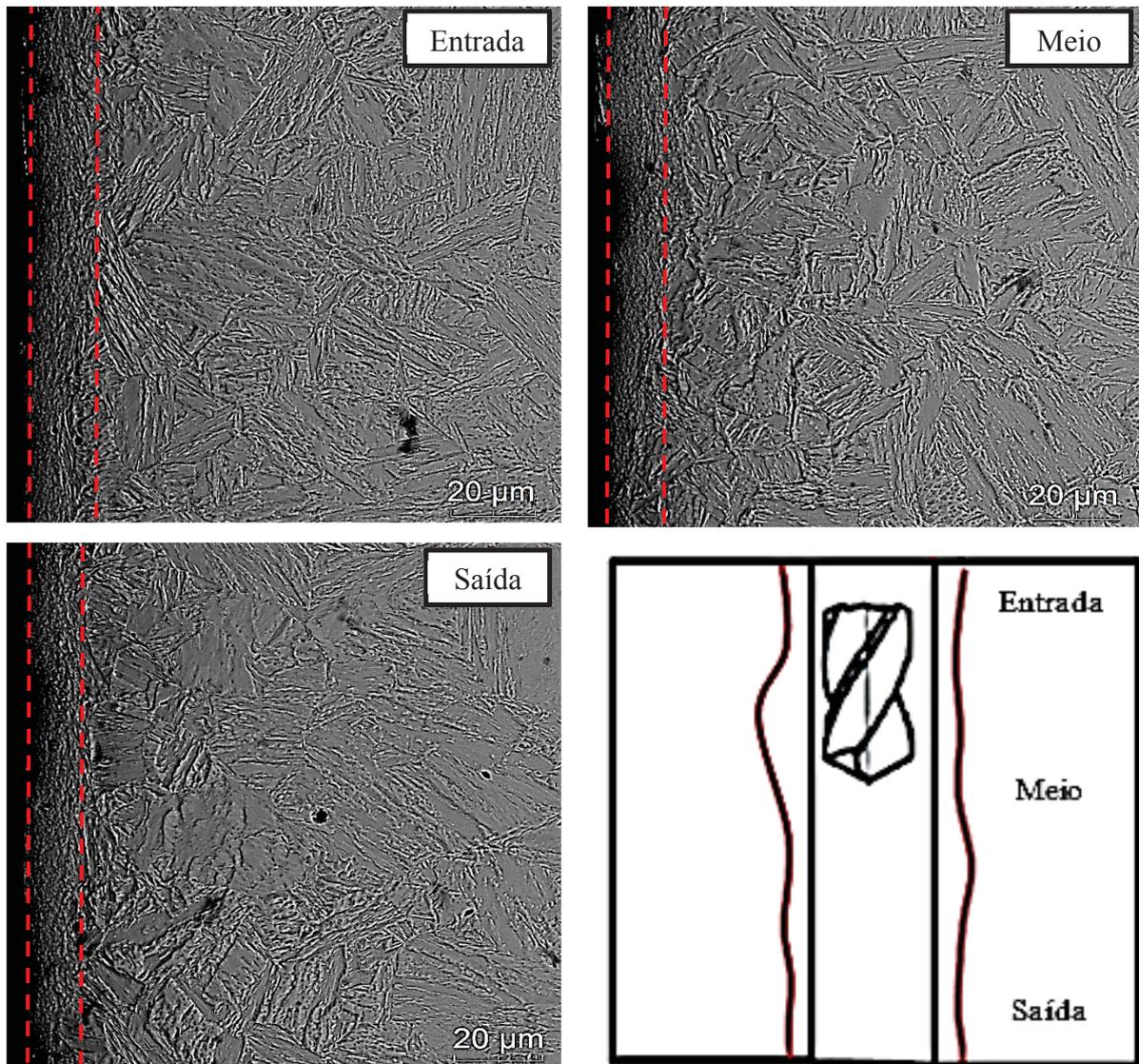
Este resultado pode estar relacionado com o menor atrito promovido entre cavaco/ferramenta/parede do furo, devido ao melhor acabamento superficial da ferramenta “B” causado pelo processo de acabamento por arraste (*drag finishing*). Mesmo em uma condição onde as temperaturas de corte e os esforços são maiores devido aos arredondamentos (guias, raios de quina e gumes transversal e principais) a camada afetada pelo calor foi menor.

Percebe-se, na figura 5.8, que em todas as situações analisadas houve uma variação dos valores médios da CAC na entrada dos furos, seguido por uma pequena alteração no meio e na saída dos furos, os valores apresentam uma redução significativa em relação à entrada do furo.

Estes resultados podem ter sido influenciados pela maior interação entre a ferramenta e a peça, na entrada do furo. Este atrito contribui para um aumento da temperatura de corte, reduzindo a resistência mecânica, o que facilita o fluxo plástico do material devido à força de penetração da ferramenta. A broca em contato com o cavaco em temperatura mais elevada pode contribuir para um arrastamento de material, o qual pode “soldar-se” nesta região, facilitando a

ocorrência de um fenômeno conhecido como deformação plástica triangular no sentido radial, que está correlacionada com o tempo de interação entre a ferramenta e a superfície do furo. Esta ocorrência pode ser responsável pela modificação microestrutural do material-base da peça (Figuras 5.9 e 5.10). À medida que a broca segue o movimento de avanço até vencer a espessura total da peça, a guia/quina da ferramenta continua promovendo altas temperaturas de corte e, possivelmente, modificações estruturais, porém em menor magnitude pelo fato de o material oferecer uma resistência mecânica reduzida quando o gume transversal rompe o centro do furo pela menor área do material abaixo da broca. O atrito entre a broca e a peça, na condição de saída, pode ser considerado menor, pois no momento em que a guia consegue romper a espessura total da chapa, não há mais interação entre a broca e a peça.

Figura 5.10 - Representação das camadas afetadas pelo calor – Ferramenta B



Fonte: O autor

Porém, na entrada do furo, as guias permanecem em contato com a mesma, favorecendo uma possível modificação estrutural. Nota-se que nas micrografias de ambas as ferramentas praticamente não ocorreram deformações plásticas abaixo da superfície usinada.

#### 5.4 Perfil de microdureza

O perfil de microdureza serve como uma análise complementar à avaliação do acabamento superficial de uma amostra. Bordin (2013) cita que a microindentação pode ser considerada como um reflexo dos efeitos térmicos/mecânicos desenvolvidos durante processo de furação.

Para correlacionar e validar os dados obtidos através das micrografias (Figuras 5.9 e 5.10) foram feitas medidas de dureza a fim de estabelecer um perfil da borda em direção ao centro do material.

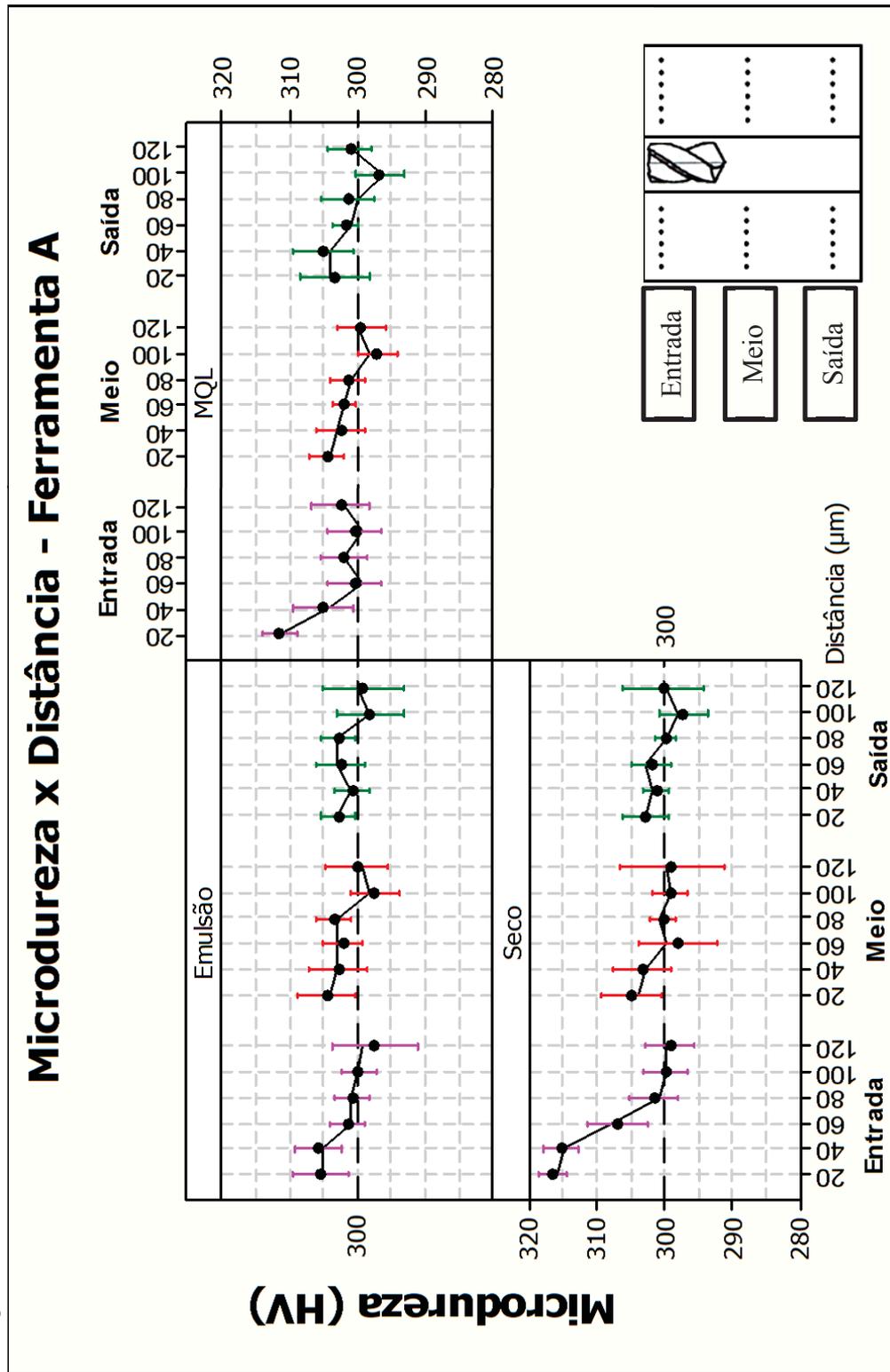
Neste trabalho utilizou-se uma distância de 20  $\mu\text{m}$  da borda do furo, sendo esta distância mantida entre as indentações (20  $\mu\text{m}$  da borda do furo e após isso: 1º ponto – 20  $\mu\text{m}$ , 2º ponto – 40  $\mu\text{m}$ , 3º ponto – 60  $\mu\text{m}$ , 4º ponto – 80  $\mu\text{m}$ , 5º ponto – 100  $\mu\text{m}$ , 6º ponto – 120  $\mu\text{m}$ ). A partir dos 120  $\mu\text{m}$  de distância da borda do furo, os valores das leituras de microdureza mostram certa estabilidade com a leitura de dureza realizada no núcleo da amostra (conforme verificado nos pré-testes), seguindo recomendações da norma NBR NM ISO 6507-1. Este procedimento prosseguiu nas condições de entrada, meio e saída.

Os resultados dos perfis de microdureza (HV 0,250 g) dos furos, para as ferramentas “A” sem preparação da mesogeometria e “B” com preparação, podem ser visualizados nas Figuras 5.11 e 5.12.

Observando os valores medidos e inseridos nos gráficos das Figuras 5.11 e 5.12, nota-se que, de um modo geral, as furações realizadas com a ferramenta “A” apresentam os maiores valores médios de microdureza (HV) em comparação com as furações realizadas com a ferramenta “B” (Apêndice, Tabela A.25).

A Figura 5.11 mostra os valores médios dos perfis de microdureza gerados para as condições de abundância, MQL e a seco, nas condições de entrada, meio e saída para a ferramenta “A”.

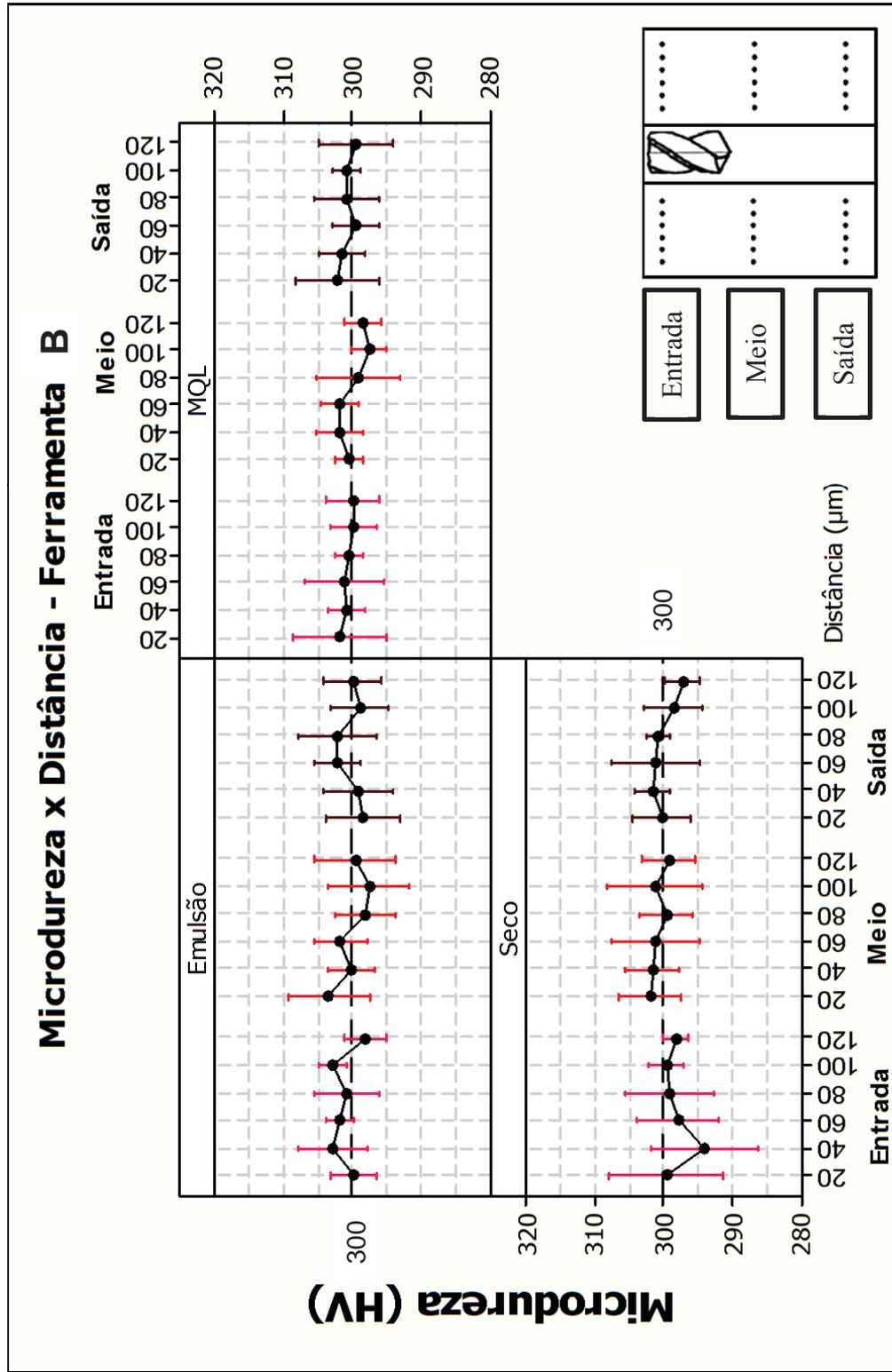
Figura 5.11 - Perfis de microdureza dos furos usinados - Ferramenta A



Fonte: O autor

A Figura 5.12 mostra os valores estatísticos dos perfis de microdureza gerados para as condições de abundância, MQL e a seco, nas condições de entrada, meio e saída para a ferramenta “B”.

Figura 5.12 - Perfis de microdureza dos furos usinados - Ferramenta B



Fonte: O autor

Estes resultados apontam para um indicativo de que a ferramenta “A” (sem preparação da mesogeometria) pode ter contribuído para alterar e modificar a microestrutura do material próximo à borda do furo, aumentando a camada afetada pelo calor e, assim, causando um incremento do perfil de microdureza. Estatisticamente, não foi constatada uma influência significativa entre as diferentes condições de aplicações dos fluidos lubrificantes em ambas as ferramentas (Apêndice, Tabela A.26).

Relacionando as deformações plásticas triangulares localizadas no sentido radial ao furo com as micrografias das Figuras 5.9 e 5.10 através do perfil de microdureza na entrada, meio e saída, não foi possível verificar diferenças estatisticamente significativas entre as condições analisadas.

Contudo, nota-se que na entrada dos furos com a ferramenta “A”, há um aumento nos valores de microdureza, principalmente nas condições a seco e MQL. O comportamento do perfil de dureza pode ter sido influenciado pelo aquecimento do material na superfície da parede do furo, este fenômeno modificou a microestrutura do material nas proximidades da borda do furo, devido ao aumento da temperatura e ao tempo de contato das guias da broca com porções deste material plastificado, contribuindo para o aumento da espessura da camada afetada pelo calor e dos valores de microdureza nesta região. Estes resultados corroboram com as micrografias realizadas nas condições de entrada, meio e saída das superfícies usinadas (Figura 5.9 e 5.10).

Apesar das micrografias realizadas mostrarem indicativos de modificações da microestrutura próxima à borda do furo, não foi possível uma análise clara da influência das solicitações térmicas e mecânicas sobre a camada afetada pelo calor através do perfil de microdureza, devido à limitação do equipamento de medição (microdurômetro) em que a menor carga disponível para aplicação é de HV 0,250 kgf. A impressão deixada na peça com esta carga promove um efeito de deformação da borda, o que torna os resultados errôneos e pouco confiáveis. A norma NBR NM ISO 6507-1 recomenda que as medições sejam realizadas a determinada distância da borda do furo e entre indentações de  $2,5x$  - o valor da maior diagonal encontrada em medições realizadas no metal da peça. Neste trabalho, este valor é de  $20 \mu\text{m}$ , porém, conforme identificado pelas as imagens da camada afetada pelo calor, as regiões de modificação da microestrutura ficam, em média, abaixo deste valor ( $20 \mu\text{m}$ ), tornando os resultados do perfil de dureza pouco significativos.

## 6 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Aqui são apresentadas as conclusões obtidas por meio do presente estudo. Ainda neste item, são apresentadas possibilidades de trabalhos futuros relacionados ao assunto.

### 6.1 Conclusões

Na furação de um aço de alta resistência e baixa liga (ARBL) DIN S700MC utilizando brocas de metal duro sem e com preparação da mesogeometria em diferentes condições de aplicação de meios lubrificador-refrigerantes, entende-se que estas variações causam modificações na textura (rugosidade) e na integridade (subsuperfície) da peça usinada. Estas variações serão apresentadas em tópicos.

Em relação à influência das variáveis analisadas sobre os valores de rugosidade, pode-se concluir que:

- A ferramenta “B” com preparação da mesogeometria (quina, guia e gumes) apresentou os menores valores de rugosidade.
- Nas furações com a ferramenta “B”, não foi verificado, estatisticamente, a influência das diferentes condições de aplicação dos fluidos lubrificador-refrigerantes sobre os valores de rugosidade. Porém, nas furações utilizando o sistema MQL e o corte totalmente sem Fluido (seco), verifica-se a presença de material aderido “plastificado” sobre a superfície usinada.
- O fenômeno de material aderido foi verificado, principalmente, na entrada dos furos para ambas as ferramentas, mas em proporções diferentes, sendo mais acentuado na ferramenta “A” sem preparação da mesogeometria. Já na saída dos furos, praticamente não foi constatado sua ocorrência.
- Na ferramenta “A”, os valores de rugosidade foram superiores aos da broca com preparação. A aplicação dos fluidos lubrificador-refrigerantes se mostra influente nos valores de rugosidade. Percebe-se que, à medida que a severidade do corte aumenta (redução da aplicação do Fluido), os valores de rugosidade também acompanham a mesma tendência de crescimento.

Em relação à influência das variáveis analisadas sobre os valores do dimensional das rebarbas geradas, pode-se concluir que:

- A rebarba gerada no processo de furação para as variáveis analisadas apontaram para uma rebarba do tipo II (chapéu) para ambas as ferramentas, sendo verificado apenas a variação de altura entre as condições analisadas.
- Nos ensaios realizados com a ferramenta “B”, esta apresentou os maiores valores de altura da rebarba gerada durante o processo de furação.
- Os resultados obtidos mostram uma possível relação entre a aplicação de Fluido em abundância (emulsão) e a redução dos valores da altura da rebarba gerada. Este fato foi constatado em ambas as ferramentas.
- Estatisticamente, as condições de aplicação de Fluido em MQL e o corte totalmente a seco mostraram influências similares entre si na formação da rebarba dentro de cada condição de ferramenta (sem e com preparação).
- Em relação à espessura da raiz da rebarba, a ferramenta “B” (com preparação) apresentou os maiores valores.

Em relação à influência das variáveis analisadas sobre os valores da camada afetada pelo calor (CAC), pode-se concluir que:

- A ferramenta “B” com preparação da mesogeometria apresentou os menores valores da CAC, nas condições de aplicações de fluidos lubrificantes analisadas.
- Na avaliação da espessura da CAC, observou-se que os valores apontados para a ferramenta com preparação da mesogeometria foram influenciados pela aplicação do Fluido lubrificante. As maiores espessuras da CAC foram registradas pela furação a seco. Por outro lado, com a aplicação de Fluido em abundância (emulsão) e com MQL, não houve variações estatísticas significativas entre si.
- Em uma avaliação geral, a espessura da camada afetada pelo calor não foi contínua ao longo da borda dos furos, sendo que na condição de entrada dos furos, a CAC foi superior, seguido pelas medições feitas no meio do furo. Já na saída do material, os valores foram reduzidos em relação às outras medições. Este fenômeno foi registrado para as duas condições das brocas.
- Os resultados apontados para as medições realizadas com a ferramenta “B” apresentaram uma tendência de aumento da CAC quando realizada a seco. A condição de aplicação

com Fluido em abundância (emulsão) e na condição MQL apontaram os menores valores de CAC e, estatisticamente, foram similares entre si.

- Para a ferramenta “A” sem preparação da mesogeometria, observou-se a mesma tendência de maiores valores da CAC para a condição a seco e as condições de aplicação em abundância (emulsão). Com o sistema MQL, os valores foram reduzidos e estatisticamente similares, não apontando variações significativas entre si.

Em relação à influência das variáveis analisadas sobre o perfil de microdureza, pode-se concluir que:

- Através dos dados obtidos nos ensaios realizados, não foi possível avaliar a influência da modificação microestrutural na borda dos furos usando a técnica de medição por microindentação devido ao efeito de deformação provocada pela indentação próxima à borda do furo, justamente onde os maiores valores de dureza estão localizados.
- Na região onde a camada afetada pelo calor foi superior a 20  $\mu\text{m}$  de espessura, por exemplo, na entrada dos furos com a ferramenta “A” e com aplicação de MQL e a seco, nota-se que os valores médios de microdureza foram superiores aos das outras condições de aplicação. Este fato pode indicar uma possível modificação microestrutural na região da borda do furo.

## 6.2 Sugestões para Trabalhos Futuros

Sabe-se da grande influência dos parâmetros de corte, principalmente sobre os valores de rugosidade. Neste sentido, sugere-se realizar ensaios com diferentes condições de corte, na tentativa de avaliar se os mesmos comportamentos sobre os efeitos estudados são válidos e possuem repetitividade.

Efetuar ensaios de longa duração (vida da ferramenta) nas mesmas condições analisadas.

Para uma completa caracterização dos fenômenos gerados com as diferentes variáveis analisadas, sugere-se realizar medições da temperatura durante a furação próximo à borda do furo e medições das forças envolvidas no processo de corte utilizando brocas com e gumes arredondados.

Como mostrado neste trabalho, a medição de microdureza não mostrou resultados consistentes para uma avaliação completa do fenômeno ocorrido. Portanto, sugere-se a utilização da técnica de nanoindentações para avaliação e quantificação dos seus valores mais próximos à borda dos furos.

Para uma avaliação do comportamento do material aderido sobre a superfície usinada, sugere-se fazer ensaios de tensão residual nos corpos de prova (furos) para análise de fadiga, utilizando as variáveis analisadas.

Realizar uma análise dimensional dos furos quanto à sua tolerância dimensional (diâmetro dos furos) e geométrica (circularidade e cilindricidade).

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABELE, E.; FUJARA, M; SCHAFER, D. **Simulation-based twist drill design and geometry optimization**. CIRP Annals - Manufacturing Technology, n. 59, p. 145-150, 2011.

ANSHU, D; JAYAL, I; BALAJI, A.K. **Effects of cutting fluid application on tool wear in machining. Interactions with tool-coatings and tool surfasse features**. Wear 267, p. 1723-1730, 2009.

ASTM E 384 (*Standard Test Method for Knoop and Vickers Hardness of Materials*).

ASTM E 407 (*Standard Practice for Microetching Metals and Alloys*).

ASTM E3 (*Standard Guide for Preparation of Metallographic Specimens*).

ASTM E45 (*Standard Test Methods for Determining the Inclusion Content of Steel*).

ASTM E8M (*Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials*).

BARLETTA. M.; RUBINO, G.; VALENTINI.P. **Experimental investigation and modeling of fluidized bed assisted drag finishing according to the theory of localization of plastic deformation and energy absorption** - Journal of Advanced Manufacturing Technology 77:2165 – 2180, 2015.

BASAVARAJAPPA, S.; CHANDRAMOHAN, G.; PRABU, M. MUKUND, K.; ASHWIN, M. **Drilling of hybrid metal matrix composites - Workpiece surface integrity**. International Journal of Machine Tools & Manufacture, n. 47, p. 92–96, 2007.

BIERMANN, D; HARTMANN, H. **Reduction of burr formation in drilling using cryogenic process cooling**. Procedia CIRP 3 85 – 90, 2012.

BIERMANN, D; IOVKOV, I; BLUM, H; RADEMACHER, A; TAEBI K; SUTTMEIER, F.T; KLEIN, N. **Thermal Aspects in Deep Hole Drilling of Aluminum Cast Alloy Using Twist Drills and MQL**. Procedia CIRP 3, 245 – 250, 2012b

BIERMANN, D; TERWEY, I. **Cutting edge preparation improve drilling tools for HPC processes**. CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology 1, 76–80, 2008.

BIERMANN, D; WOLF, M.; ABMUTHA, R. **Cutting edge preparation to enhance the performance of single lip deep hole drills** - Procedia CIRP 1, 172 – 177, 2012a.

BIERMANN. D.; DENKENA. B. **Cutting edge geometries** - CIRP Annals - Manufacturing Technology 63, 631– 653, 2014.

BORDIN, F, M. **Efeito do tratamento da microgeometria de brocas helicoidais de metal-duro sobre a integridade superficial dos furos** – Universidade de Caxias do Sul – Dissertação de Mestrado – Caxias do Sul, RS, 2013.

BOSHEH, S. S., MATIVENGA, P. T. **White layer formation in hard turning of H13 tool steel at high cutting speeds using CBN tooling.** International Journal of Machine Tools and Manufacture 46, 225–233, 2006.

BRANDÃO L, C; COELHO R, T; LAURO C, H. **Contribution to dynamic characteristics of the cutting temperature in the drilling process considering one dimension heat flow.** Applied Thermal Engineering 31, 3806 e 3813, 2011.

BU, Y; LIAO, W, H; TIAN, W; SHEN, J, X; HU, J. **An analytical model for exit burrs in drilling of aluminum materials.** International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2015.

BURHANUDDIN, Y, R; CHE, H; GHANI, J, A. **The effect of tool edge geometry on tool performance and surface integrity in turning Ti6Al4V alloys.** Advanced Materials Research 264–265:1211–1221, 2011.

BURTON, G; GOO C, S; ZHANG Y; JUN M, B, G. - **Use of vegetable oil in water emulsion achieved through ultra-sonic atomization as cutting fluids in micro milling.** Journal of Manufacturing Processes 16, 405–413, 2014.

CALLISTER, W; WILLIAM D. **Ciência e Engenharia de materiais: Uma introdução 8ª Edição** – Rio de Janeiro, LTC, 2012.

CASTILLO, W. J. G. **Furação profunda de ferro fundido cinzento GG25 com brocas de metal-duro com canais retos.** Universidade Federal de Santa Catarina, Dissertação de Mestrado, Florianópolis, SC, 2005.

CHEUNG, F.Y; ZHOU, Z.F.; GEDDAM, A.; LI, K.Y. **Cutting edge preparation using magnetic polishing and its influence on the performance of high-speed steel drills.** Journal of Materials Processing Technology, n. 208, p. 196–204, 2008.

CHOU K.; SONG, H. **Tool nose radius effects on finish hard turning** – Journal of Materials Processing Technology 148, 259–268, 2004.

CUNHA, A.; PEREIRA, A.; RIBEIRO, J,R,S; MARTINS, K,C,R; SILVA, M,B; EVES, T,E,S,B; RODRIGUES, J,R,P. **Study of the application of sunflower oil in the process of drilling ABNT 1045 steel.** Acta Scientiarum technologic, 2014.

DAVIM, J, P. **Surface Integrity in Machining.** Editora Springer, London (2010).

DEMIR, H. **The effects of micro alloyed steel pre-heat treatment on microstructure and machinability.** International Journal Advanced Manufacturing Technology 35, 1041–1046, 2008.

DENKENA, B.; FRIEMUTH, T.; FEDORENKO, S.; GROPE, M. **An der Schneide wird das Geld verdient – Neue Parameter zur Charakterisierung der Schneidengeometrien an Zerspanwerkzeugen, Fertigung.** Sonderausgabe Werkzeuge 12: 24-26, 2002.

DENKENA, B.; KOEHLERA. J.; REHEA M. **Influence of the Honed Cutting Edge on Tool Wear and Surface Integrity in Slot Milling of 42CrMo4 Steel** - Procedia CIRP 1 – Germany 190 – 195, 2012.

DINIZ, A, E; MARCONDES C, F; COPPINI L, N. **Tecnologia da usinagem dos materiais – 8º edição** – São Paulo – Editora Artiber, 2013.

DORNFELD, D, A. **Strategies for Preventing and Minimizing Burr Formation**. CIRP HPC conference in Aachen, Germany, 2004.

DORNFELD, D, A; BHANDARI, B, HONG Y, S; YOON, H, S, MOON, J, C; PHAM, M, Q; LEE, G, B; HUANG, Y, LINKE, S, B; AHN, S, H. **Development of a micro-drilling burr-control chart for PCB drilling**. Precision Engineering 38 - 221– 229, 2014.

DORNFELD, D.; AURICH, J.C; ARRAZOLA. P.J.; FRANKE, V; LEITZ, L.; MIN.S. **Burrs - Analysis, control and removal**. CIRP Annals - Manufacturing Technology 58, 519–542, 2009.

EBRAHIMI A; MOSHKAR, M, M. **Evaluation of machinability in turning of microalloyed and quenched-tempered steels: tool wear, statistical analysis, chip morphology**. Journal of materials processing technology 209, 910–921, 2009.

FARIAS, A. **Análise de tensão residual e integridade superficial no processo de torneamento em material endurecido do aço ABNT 8620 cementado**. Dissertação Mestrado, Departamento de Engenharia Mecatrônica e de Sistemas Mecânicos, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, SP, 2009.

FERREIRA, C, M. **Análise comparativa entre alargamento com ferramenta de gume único regulável e mandrilamento em ferro fundido nodular GGG40**. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Santa Catarina – Florianópolis, SC, 2011.

FULEMOVA, J; ZADENEK J. **Influence of the cutting edge radius and the cutting edge preparation on tool life and cutting forces at inserts with wiper geometry**. Procedia Engineering 69, 565 – 573, 2014.

GHIOTT, A; BRUSCHI, S; BORDIN, A. **The effect of cutting speed and feed rate on the surface integrity in dry turning of Co-Cr-Mo alloy**. Procedia CIRP 13 219 – 224, 2014.

GORNI, A, A. **Aços avançados de alta resistência: Microestrutura e propriedades mecânicas**. Trabalho apresentado no 5º congresso de corte e conformação de metais, São Paulo 2009.

GUIBERT, N.; PARIS, H.; RECH, J.; CLAUDIN, C. **Identification of thrust force models for vibratory drilling**. International Journal of Machine Tools & Manufacture, n. 49, p. 730-738, 2009.

GUO, A.; MISRA, R, D,K.; XU, J.; GUO B.; JANSTO, S,G. **Ultrahigh strength and low yield ratio of niobium-microalloyed 900MPa pipeline steel with nano/ultrafine bainitic lath**. Materials Science and Engineering A, 527 3886 – 3892, 2010.

HARDY, M.C. KWONG, J.; AXINTE, D.A.; WITHERS, P.J.; **Minor cutting edge Workpiece interactions in drilling of an advanced nickel-based superalloy.** International Journal of Machine Tools & Manufacture, n. 49, p. 645–658, 2009.

HEILER, R.; ZEILMANN, R, P.; VACARO, T.; SOARES, R.; TEIXEIRA, R, C. **Estudo da formação de cavaco na furação a seco do aço AISI P20 endurecido** - 6º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação – Caxias do Sul, RS – BRASIL, 2011.

HERBERT, C, R, J. KWONG, J; KONG, M.C; AXINTE, D, A. HARDY, M.C; WITHERS, P.J. **An evaluation of the evolution of workpiece surface integrity in hole making operations for a nickel-based superalloy.** Journal of Materials Processing Technology 212, 1723 – 1730, 2012.

HERBERT, C; M’SAOUBI, R; AXINTE, D; HARDY, M,C ; PAUL SALMON, P. **Surface integrity of nickel-based alloys subjected to severe plastic deformation by abusive drilling.** CIRP Annals - Manufacturing Technology 63 61–64, 2014.

KHAN, N. Z.; ZAHID A. K, ARSHAD N, S., ARINDAM K. C. **Investigations on the effect of wire EDM process parameters on surface integrity of HSLA: a multi-performance characteristics optimization.** Production & Manufacturing Research Vol. 2,501– 518, 2014.

KLAUBERG, A, L. **Aplicação de mínimas quantidades de Fluido de corte nos processos de furação e rosqueamento interno de eixos para motores elétricos.** Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, p 18, 2008.

KLOCKE, F. Manufacturing Processes 1: **Lathing, Milling, Drilling.** Edição 1º, editora Springer, p, 547, 2011.

KLOCKE, F; BOUZAKIS, K.D.; KOMBOGIANNIS, S.; MAKRIMALLAKIS, S.; SKORDARIS, G.; MICHAILIDIS, N.; CHARALAMPOUS, P.; PARASKEVOPOULOU,R.; M’SAOUBI, R.; AURICH J.C.; BARTHELMA,F.; BIERMANN, D.; DENKENA,B.; D. DIMITROV, D.; ENGIN, S.; KARPUSCHEWSKI,B.; OZEL, T.; POULACHONM, G.; RECH, J.; SCHULZE, V.; SRIVASTAVA, A.; WEGENER, K.; UHLMANN, E.;ZEMAN, P. **Effect of cutting edge preparation of coated tools on their performance in milling various materials** - CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology 7, 264–273, 2014.

KNAPP, W; WEGENER, K; WYEN, C. **A new method for the characterisation of rounded cutting edges.** Journal of Advanced Manufacturing Technology 59, 899–914, 2012.

KRISHNARAJ. V.; SENTHILKUMAR, M.; PRABUKARTHI, A. **Study on Tool Wear and Chip Formation during Drilling Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP)/ Titanium Alloy (Ti6Al4V) Stacks.** International Conference on Design and Manufacturing (IConDM) 2013.

KURT, M.; KAYNAK, Y.; BAGCI, E. **Evaluation of drilled hole quality in Al 2024 alloy.** International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol 37, p 1051 – 1060, 2008.

KWONG, J.; AXINTE, D.A.; WITHERS, P.J.; HARDY, M.C. **Minor cutting edge-workpiece interactions in drilling of an advanced nickel-based superalloy**. International Journal of Machine Tools & Manufacture, n. 49, p. 645–658, 2009.

LAWAL S. A., CHOUDHURY I. A., NUKMAN Y. **A critical assessment of lubrication techniques in machining processes: a case for minimum quantity lubrication using vegetable oil-based lubricant**. Journal of Cleaner Production, v. 41, p. 210 - 221, 2013.

LAWAL, S, A.; CHOUDHURY, I, A.; NUKMAN, Y. **Application of vegetable oil based metal working fluid sin machining ferrous metals**. A review – International Journal of Machine Tools & Manufacture 52, 1 - 12, 2012.

LIMA, A., **Análise dos efeitos gerados pelos parâmetros de corte em processos de usinagem sobre a integridade superficial das peças em aço ABNT 4340** – Tese de Doutorado – Santa Barbara do Oeste – p 25, 2008.

LÓPEZ DE LACALLE, L.N.; FERNÁNDEZ, A.; OLVERA, D.; LAMIKIZ, A.; OLVERA, D.; RODRÍGUEZ, C. ELIAS, A. **Monitoring deep twist drilling for a rapid manufacturing of light high-strength parts**. Mechanical Systems and Signal Processing, n. 25, 2745-2752, 2011.

LU, C. **Study on prediction of surface quality in machining process**. Journal of Materials Processing Technology, n. 205:1–3, p. 439-450, 2008.

MACHADO, A, R; ABRÃO, M, A; COELHO, T, R; SILVA, B, M; **Teoria da usinagem dos materiais** – 2º ed. – São Paulo, Blucher editora, 2011b.

MACHADO, A, R; COSTA, E, S. **Avaliação do erro de circularidade na furação do aço microligado DIN 38MnS6 com aplicação de diferentes sistemas lubrificantes**. 6º CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE FABRICAÇÃO. Caxias do Sul – RS, 2011c.

MACHADO, A, R; SILVA L, C.; PENA, J, L, O.; DUARTE M.A.V. **Estimativa da altura da rebarba formada no fresamento pelo monitoramento de sinais de vibração**. VI National Congress of Mechanical Engineering. Campina Grande – Paraíba, Brasil, 2009a.

MACHADO, A, R; SILVA, M, B; COSTA, E, S. **Burr Produced on the Drilling Process as a Function of Tool Wear and Lubricant-Coolant Conditions**. Journal of the Brazil Science. of Mechanical Science e Engineer, 2009b.

MACHADO, A.; COSTA, E.; NELIS, L.; SILVA, M; EZUGWU, E. **Influence of tellurium addition on drilling of microalloyed steel DIN 38MnS6**. Industrial Lubrication and Tribology, Vol. 63 Iss: 6, p.420 – 426, 2011a.

MARCHIORI, M, M. **Estudo de um sistema de medição a laser na medição da textura da superfície gerada por torneamento**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Dissertação de Mestrado, Porto Alegre, p 10, 2013.

MARQUES, M, F. **Avaliação do desempenho de brocas helicoidais de aço rápido revestido na usinagem de ferro fundido nodular GGG 50** – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Dissertação de Mestrado, Porto Alegre, p 23, 2012.

MEYER, D; JAWAHIR I.S; BRINKSMEIER. E; M'SAOUBI, R; ASPINWALL, D.K; UMBRELLO, D; JAYAL, A.D; OUTEIRO, J.C. **Surface integrity in material removal processes: Recent advances**. CIRP Annals - Manufacturing Technology 60, p 603 – 626, 2011.

MITCHELL, R.J., PREUSS, M., TIN, S., HARDY, M.C., **The influence of cooling rate from temperatures above the solvus on morphology, mismatch and hardness in advanced polycrystalline nickel-base super alloys**. Materials. Science and Engineering A 473, 158–165, 2008.

MONDAL, N; BISWAJIT S, S; HALDER, R, N; DAS, S. **Observation of Drilling Burr and Finding out the Condition for Minimum Burr Formation**. International Journal of Manufacturing Engineering, India, 2014.

MONDELIN A; VALIORGUE, F; CORET M; FEULVARCHA, E; RECHA J. **Surface integrity prediction in finish turning of 15-5PH stainless steel** - Procedia Engineering 19, 270 – 275, 2011.

NBR 4287 - Especificações geométricas do produto (GPS) - Rugosidade: Método do perfil - Termos, definições e parâmetros da rugosidade

NICOLA G, L.; ZEILMANN R, P.; VACARO T.; TEIXEIRA R, C.; HEILER R. **Implications of the reduction of cutting fluid in drilling AISI P20 steel with carbide tools**. International Journal of the Advanced Manufacturing Technology. V. 58, p. 431 – 441, 2012.

OLIVEIRA, F, B; RODRIGUES, A, R; COELHO, R, T; SOUZA, A, F. **Size effect and minimum chip thickness in micro milling**. International Journal of Machine Tools e Manufacture 89, 39-54, 2015.

ÖZÇELİK, B.; KURAM, E; CETIN, M. H.; DEMIRBAS, E. **Experimental investigations of vegetable based cutting fluids with extreme pressure during turning of AISI 304L**. Tribology International, v44, n.12, p.1864 – 1871, 2011.

ÖZEL T, KARPAT Y, SRIVASTAVA A. **Hard Turning with Variable Micro-geometry PcBN Tools**. CIRP Annals 57, p 73–76, 2008.

PAGGETT, J. W. **Neutron Diffraction Study of Load Response and Residual Stresses in WC (Ni/Co) Composites**. Tese de Doutorado. University of Missouri Columbia, 2005.

PARK, DAE-BUM; HUH, MOO-YOUNG.; SHIM, JAE-HYEOK.; SUH, JIN-YOO; LEE, KYU-HO; JUNG, WOO-SANG. **Strengthening Mechanism of Hot Rolled Ti and Nb Microalloyed HSLA Steels Containing Mo and W with Various Coiling Temperature**. Materials Science & Engineering A, p 528-534, 2013.

PINTAUDE, G.; BELTRAO, C.; OLIVEIRA, V. **Effect of tool geometry on the wear of cemented carbide coated with TiAlN during drilling of compacted graphite iron.** *Wear* 271, p 2561 – 2569, 2011.

PINTO, G, T, B. **Análise da influência da geometria de brocas especiais na furação de chapas finas aeronáuticas.** Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Santa Catarina - Florianópolis, SC, p. 59, 2010.

RAHIM, E, A; SASAHARA, H. **A Study of the Palm Oil as MQL Lubricant on high Speed Drilling of Titanium Alloys.** *Tribology International*, 2011.

RISSE, K. **Einflüsse von Werkzeugdurchmesser und Schneidkantenverrundung beim Bohren mit Wendelbohrern in Stahl.** Dissertação de Mestrado, RWTH Aachen, Aachen, p 153, 2006.

RODRIGUEZ, C, J, C. **Cutting edge preparation of precision cutting tools by applying micro-abrasive jet machining and brushing.** Tese de Doutorado, Universidade de Kassel, Alemanha, p 205, 2009.

ROSARIO, J, F, A. **Estudo da integridade superficial e seu efeito na fadiga de um aço ferramenta.** Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo, SP, 2011.

SANTANA, M, I; POLLI, M, L. **The Influence of Twist Drill Main Cutting Edge Preparation in Drilling Process.** *Materials Research*, 18; 148 – 153, 2015.

SARNI, E, A. **Utilização da mínima quantidade de lubrificante (MQL) com água no processo de retificação cilíndrica externa de mergulho de cerâmicas com rebolo diamantado.** Dissertação de Mestrado – Universidade Estadual Paulista – SP, 2011.

SCHROETER, B. R. **Descrição da geometria de broca helicoidal a partir de modelos matemáticos combinados a métodos de medição tridimensional - V Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação – 2009.**

SETTINERI, L.; VERGNANO, G.; RIZZUTI, S.; PRIARONE, P. **Effects of cutting angle, edge preparation, and nano-structured coating on milling performance of a gamma titanium aluminide.** *Journal of Materials Processing Technology* 212, 2619 – 2628, 2012.

SHARMA, J.; SIDHU, S, B.; **Investigation of effects of dry and near dry machining on AISI D2 steel using vegetable oil.** *Journal of Cleaner Production* 66, p 619 – 623, 2014.

SHARMAN, A.R., AMARASINGHE, A., RIDGWAY, K., **Tool life and surface integrity aspects when drilling and hole making in Inconel 718.** *Journal of Materials Processing Technology* 200, 424 – 432, 2008.

SILVA, E. P. **Caracterização das Transformações de Fase de um Aço ARBL da Classe S700MC.** Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, RS, 2010.

SILVA, L, C. **Comportamento da Rebarba no Fresamento de Faceamento do Aço Inoxidável PH 13 8Mo**. Tese de Doutorado – Universidade Federal de Uberlândia, p 55, 2011.

SILVA, N, N. **Simulação da laminação de aço micro ligado ao nióbio utilizando ensaios de torção**. Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual de Minas Gerais. Ouro Preto, MG, 2014.

SIVARAMAN, V.; SANKARAN, S.; VIJAYARAGHAVAN, L. **A study on the influence of cutting parameters on forces during machining the multiphase V-microalloyed steel** – International journal Advanced Manufacturing Technology 79:1285–1292, 2015.

SOUZA, A, J. **“Processos de Fabricação por usinagem, Parte I: Fundamentos de usinagem dos materiais”**. GPFAI, DEMEC, UFRGS, Apostila, 2011.

SOUZA, A, J; MATTES, B. F; MOGNAGA, G.F. **Análise dos esforços de corte na furação de ferro fundido DIN GGG50 para brocas de metal duro com diferentes microgeometrias**. VII Congresso Nacional de Engenharia Mecânica. Uberlândia – MG – Brasil, 2014.

STEPIEN, P. **Micro- geometrical characteristics of the cutting edge as the intersection of two rough surfaces**. Wear, n. 269, p. 249 – 261, 2010.

SUGIHARA, T.; NISHIMOTO, Y.; ENOMOTO, T. **On-machine tool resharpener for dry machining of aluminum alloys**. Procedia CIRP 24, p 68 – 73, 2014.

TAGLIAFERRI, V.; RUBINO, G.; PIETROBONO, F.; BARLETTA, M. **Drag finishing of sensitive workpieces with fluidized abrasives**. Journal of Manufacturing Processes 16 494–502, 2014.

TEDESCO, E, M. **Variação dimensional e microestrutural do Aço AISI 4140 em peças usinadas por torneamento**. Universidade de Caxias do Sul – Dissertação de Mestrado – Caxias do Sul, 2007.

TIKAL, F. **SchneidkantenpräparationZiele, Verfahren und Messmethoden - Berichte aus Industrie und Forschung**, 2009.

TUSSET, F. **Efeitos da microgeometria de brocas helicoidais de metal duro na furação a seco de ferro fundido nodular GGG 50** – Dissertação de Mestrado – UPF, 2015.

TUSSET, F; CONSALTER L, A ; DURAN, O. **The effects of microgeometries in carbide twist drill on dry drilling of cast iron**. Int J Adv Manuf Technol, 2016.

ULUTAN, D.; ÖZEL, T. **Machining induced surface integrity in titanium and nickel alloys: A review**. International Journal of Machine Tools & Manufacture, n. 51, p.250 –280, 2011.

VEERABABU, R.; SHOW, B, K.; BALAMURALIKRISHNAN R.; MALAKONDAIAH, G. **Effect of vanadium and titanium modification on the microstructure and mechanical properties of a micro alloyed HSLA steel**. Materials Science and Engineering A 527 1595–1604, 2010.

WANG, G.; YI, H; DU, L.; LIU, X. **Fatigue Property of Low Cost and High Strength Wheel Steel for Commercial Vehicle.** Journal of iron and steel research, international, 16 (4):44-48, 77, 2009.

WANG, G.; YI, H; DU, L.; LIU, X. **Strengthening Mechanism of a New 700 MPa Hot Rolled High Strength Steel.** Journal of iron steel research international, Vol 15, p 76-80. 2008.

WEINERT, K., INASAKI, I., SUTHERLAND, J. W., WAKABAYASHI, T. **Dry Machining and Minimum Quantity Lubrication.** CIRP Annals - Manufacturing Technology, Vol. 53, 2<sup>a</sup> Ed., pp. 511-537. 2004.

WOLF, M.; ABMUTH R.; BIERMANN, D.; **Cutting edge preparation to enhance the performance of single lip deep hole drills.** Procedia CIRP 1, 172 – 177, 2012.

XINPINH, M; XIANGDONG, H; XINJUN, S; YIZHONG, C. **Strengthening mechanisms of a new 700MPa hot rolled Ti-microalloyed steel produced by compact strip production.**Journal of Materials Processing Technology 210, 1660–1666, 2010.

YUSSEFIAN N.Z.; KOSHY P. **Parametric characterization of the geometry of honed cutting edges.** Precision Engineering 37, 746– 752, 2013.

ZEILMANN, R, P.; BORDIN F, M., VACARO T. **Effects of the cutting fluid reduction on the dimensional quality of holes.** Journal Engineering manufacture, V 11, 2014.

ZEILMANN, R, P; BORDIN, F, M. **Effect of the cutting edge preparation on the surface integrity after dry drilling.** 2nd CIRP Conference on Surface Integrity (CSI) – Procedia CIRP 13:103-107, 2014.

ZEILMANN, R, P; VACARO, T; REIS, S, E; WESTPHAL, J, C. **Desempenho de fresa de aço rápido após tratamento superficial.** VII Congresso Brasileiro de Engenharia de Produção, Itatiaia – Rio de janeiro, 2013.

ZEILMANN, R.P. **Furação da liga de titânio Ti6Al4V com mínimas quantidades de Fluido de corte.** Tese de Doutorado, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, 41 p., 2003.

ZHANG, S.; LI, J. F.; WANG, Y. W. **Tool life and cutting forces in end milling Inconel 718 under dry and minimum quantity cooling lubrication cutting condition.** Journal of Cleaner Production, v. 32, n. 3, p. 81-87, 2012.

## APÊNDICE – TRATAMENTO ESTATÍSTICO DOS RESULTADOS

As análises estatísticas foram realizadas através da análise de variância (ANOVA), considerando um nível de significância  $\alpha$  de 5% (0.05) em todos os tratamentos analisados. As tabelas A1 à A27 apresentam os resultados.

Tabela A 1 - ANOVA para os valores de Rugosidade (Ra)

Variável dependente: Rugosidade					
Fonte	Soma dos quadrados	Grau de liberdade	Quadrado médio	Teste f	Significância
<b>Ferramenta</b>	3,077	1	3,077	253,81	0,0000
<b>Fluído</b>	1,394	2	0,697	57,52	0,0000
<b>Condição</b>	11,733	1	11,733	967,69	0,0000
<b>Ferramenta * Fluído</b>	0,6238	2	0,3119	25,725	0,0000
<b>Ferramenta * Condição</b>	1,7254	1	1,7254	142,30	0,0000
<b>Erro</b>	0,7760	64	0,012		
<b>Total</b>	19,331	71			

Tabela A 2 - Teste de Tukey para ferramenta - Rugosidade

Tratamentos	Médias
<b>B</b>	0,8783 a1
<b>A</b>	1,2918 a2

Tabela A 3 - Teste de Tukey para os Flúidos - Rugosidade

Tratamentos	Médias
<b>Emulsão</b>	0,9401 a1
<b>MQL</b>	1,0421 a2
<b>Seco</b>	1,2729 a3

Tabela A 4 - Teste de Tukey para condição de entrada e saída dos furos - Rugosidade

Tratamentos	Médias
<b>Saída</b>	0,6813 a1
<b>Entrada</b>	1,4887 a2

Para avaliar as relações entre as ferramentas e as diferentes condições de aplicação dos fluídos lubrificador-refrigerantes, as tabelas A5 à A7 apresentam a análise de variância e os testes de Tukey realizados para os fluídos.

Tabela A 5 - ANOVA para os valores de rugosidade entre os Flúidos

Variável dependente: Rugosidade Ra					
Fonte	Soma dos quadrados	Grau de liberdade	Quadrado médio	Teste f	Significância
<b>Fluído</b>	1,9403	2	0,9701	80,012	0,0000
<b>Fluído</b>	0,0784	2	0,0392	3,235	0,0447
<b>Erro</b>	0,7760	64	0,0121		

Tabela A 6 - Teste de Tukey para o Fluído, dentro do grupo da ferramenta "A"

Tratamentos	Médias
<b>Emulsão</b>	1,0445 a1
<b>MQL</b>	1,2285 a2
<b>Seco</b>	1,6025 a3

Tabela A 7 - Teste de Tukey para o Fluído, dentro do grupo da ferramenta "B"

Tratamentos	Médias
<b>Emulsão</b>	0,8358 a1
<b>MQL</b>	0,8558 a1
<b>Seco</b>	0,9433 a1

Os valores estatísticos para rugosidade, considerando as condições de entrada e saída dos furos, são mostrados nas tabelas A8 à A10.

Tabela A 8 - ANOVA para os valores de rugosidade entre as condições de entrada e saída

Variável dependente: Rugosidade Ra					
Fonte	Soma dos quadrados	Grau de liberdade	Quadrado médio	Teste f	Significância
<b>Condição</b>	11,2292	1	11,2292	926,08	0,0000
<b>Condição</b>	2,2300	1	2,2300	183,913	0,0000
<b>Erro</b>	0,7760	64	0,0121		

Tabela A 9 - Teste de Tukey para condição, dentro do grupo da ferramenta "A"

Tratamentos	Médias
<b>Saída</b>	0,7333 a1
<b>Entrada</b>	1,8503 a2

Tabela A 10 - Teste de Tukey para a condição, dentro do grupo da ferramenta "B"

Tratamentos	Médias
<b>Saída</b>	0,6294 a1
<b>Entrada</b>	1,1272 a2

A análise de variância e os testes de Tukey para as ferramentas e Fluidos podem ser visualizados nas tabelas A11 à A13.

Tabela A 11 - ANOVA para os valores de rebarba

Variável dependente: Rebarba					
Fonte	Soma dos quadrados	Grau de liberdade	Quadrado médio	Teste f	Significância
<b>Ferramenta</b>	502730,63	1	502730,63	932,99	0,0000
<b>Fluído</b>	68525,34	2	34262,67	63,587	0,0000
<b>Ferramenta* Fluído</b>	2665,61	2	1332,80	2,474	0,1013
<b>Erro</b>	16165,01	30	538,83		

Tabela A 12 - Teste de Tukey para ferramentas - Rebarba

Tratamentos	Médias
<b>A</b>	212,83 a1
<b>B</b>	449,17 a2

Tabela A 13 - Teste de Tukey para os Fluidos - Rebarba

Tratamentos	Médias
<b>Emulsão</b>	269,67 a1
<b>MQL</b>	355,78 a2
<b>Seco</b>	367,54 a2

Para avaliar as relações entre a rebarba gerada pelo processo e as diferentes condições de aplicação dos Fluidos lubrificarrefrigerantes, as tabelas A14 à A16 apresentam a análise de variância e os testes de Tukey realizados para os Fluidos.

Tabela A 14 - ANOVA para os valores de rebarba entre os Fluidos

Variável dependente: Rebarba					
Fonte	Soma dos quadrados	Grau de liberdade	Quadrado médio	Teste f	Significância
<b>Fluído</b>	43375,45	2	21687,75	40,249	0,0000
<b>Fluído</b>	27815,51	2	13907,75	25,811	0,0000
<b>Erro</b>	16165,01	30	538,83		

Tabela A 15 - Teste de Tukey para ferramenta A - Fluído

Tratamentos	Médias
<b>Emulsão</b>	145,63 a1
<b>MQL</b>	231,31 a2
<b>Seco</b>	261,54 a2

Tabela A 16 - Teste de Tukey para ferramenta B - Fluido

<b>Tratamentos</b>	<b>Médias</b>
<b>Emulsão</b>	393,71 a1
<b>MQL</b>	473,55 a2
<b>Seco</b>	480,25 a2

Os valores de camada afetada pelo calor (CAC) podem ser observados pela análise de variância e os testes de Tukey realizados para as ferramentas, Fluidos e condições de entrada, meio e saída dos furos, os quais podem ser visualizados nas tabelas A17 à A20.

Tabela A 17 - ANOVA para os valores de camada afetada pelo calor (CAC)

Variável dependente: CAC					
<b>Fonte</b>	<b>Soma dos quadrados</b>	<b>Grau de liberdade</b>	<b>Quadrado médio</b>	<b>Teste f</b>	<b>Significância</b>
<b>Ferramenta</b>	389,12	1	389,12	115,43	0,0000
<b>Fluido</b>	358,22	2	179,11	53,13	0,0000
<b>Condição</b>	992,00	2	496,00	147,13	0,0000
<b>Ferramenta * Fluido</b>	91,62	2	45,81	13,59	0,0000
<b>Ferramenta * Condição</b>	134,29	2	67,14	19,92	0,0000
<b>Fluido * Condição</b>	92,77	4	23,19	6,881	0,0001
<b>Erro</b>	316,87	94	3,37		
<b>Total</b>	2374,91	107			

Tabela A 18 - Teste de Tukey para as ferramentas - CAC

<b>Tratamentos</b>	<b>Médias</b>
<b>B</b>	14,96 a1
<b>A</b>	18,75 a2

Tabela A 19 - Teste de Tukey para os Fluidos - CAC

<b>Tratamentos</b>	<b>Médias</b>
<b>Emulsão</b>	15,30 a1
<b>MQL</b>	15,86 a1
<b>Seco</b>	19,41 a2

Tabela A 20 - Teste de Tukey para as condições - CAC

<b>Tratamentos</b>	<b>Médias</b>
<b>Saída</b>	12,86 a1
<b>Meio</b>	17,52 a2
<b>Entrada</b>	20,19 a3

A análise de variância, os testes de Tukey e os valores da CAC, dentro do grupo das ferramentas comparando os Fluídos, podem ser visualizados nas tabelas A21 à A23.

Tabela A 21 - ANOVA para a CAC entre o grupo das ferramentas considerando os Fluídos

Variável dependente: CAC					
Fonte	Soma dos quadrados	Grau de liberdade	Quadrado médio	Teste f	Significância
<b>Fluído</b>	406,03	2	203,01	60,22	0,0000
<b>Fluído</b>	43,81	2	21,90	6,499	0,0022
<b>Erro</b>	316,87	94	3,37		

Tabela A 22 - Teste de Tukey para os Fluídos dentro do grupo da ferramenta A

Tratamentos	Médias
<b>Emulsão</b>	16,44 a1
<b>MQL</b>	17,22 a1
<b>Seco</b>	22,61 a2

Tabela A 23 - Teste de Tukey para os Fluídos dentro do grupo da ferramenta B

Tratamentos	Médias
<b>Emulsão</b>	14,16 a1
<b>MQL</b>	14,50 a1
<b>Seco</b>	16,22 a2

Os perfis de microdureza podem ser observados pela análise de variância e os testes de Tukey realizados para as ferramentas, Fluídos e condições de entrada, meio e saída dos furos, os quais podem ser visualizados nas tabelas A24 à A27.

Tabela A 24 - ANOVA para os valores de microdureza HV

Variável dependente: Microdureza HV					
Fonte	Soma dos quadrados	Grau de liberdade	Quadrado médio	Teste f	Significância
<b>Ferramenta</b>	402,22	1	402,22	22,89	0,0000
<b>Fluído</b>	12,66	2	6,33	0,360	0,6977
<b>Condição</b>	55,68	2	27,84	1,584	0,2067
<b>Ferramenta * Fluído</b>	165,35	2	82,67	4,705	0,0097
<b>Ferramenta * Condição</b>	290,04	2	145,02	8,253	0,0003
<b>Erro</b>	5517,66	314	17,57		
<b>Total</b>	6443,63	323			

Tabela A 25 - Teste de Tukey para as ferramentas - Microdureza

<b>Tratamentos</b>	<b>Médias</b>
<b>B</b>	299,82 a1
<b>A</b>	302,04 a2

Tabela A 26 - Teste de Tukey para os Flúidos - Microdureza

<b>Tratamentos</b>	<b>Médias</b>
<b>Emulsão</b>	300,65 a1
<b>MQL</b>	301,04 a1
<b>Seco</b>	301,10 a1

Tabela A 27 - Teste de Tukey para as condições - Microdureza

<b>Tratamentos</b>	<b>Médias</b>
<b>Entrada</b>	301,51 a1
<b>Meio</b>	300,59 a1
<b>Saída</b>	300,69 a1

## APÊNDICE – EQUIPAMENTO PARA PREPARAÇÃO DA MESOGEOMETRIA

Para reafiação e arredondamento da mesogeometria das brocas, foram utilizados uma retífica de reafiação CNC em (A) e um equipamento de *drag finishing* (acabamento por arraste) em “B”. Os equipamentos podem ser visualizados na Figura B.1.

Figura B 1- Retífica CNC em “A” e equipamento para acabamento por arraste em “B”



Fonte: Adaptado de WM Tools < [www.wmtools.com.br](http://www.wmtools.com.br) > acesso em 10/04/2016.